

Національний авіаційний університет
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КУЗЬМИЧ ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 043.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**Методи та засоби вимірювання напружень та деформацій
складних конструкцій приладовою системою**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Л.В. Кузьмич

Науковий консультант _____ Квасніков Володимир Павлович,
Заслужений метролог України, доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Кузьмич Л.В. «Методи та засоби вимірювання напружень та деформацій складних конструкцій приладовою системою». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 «Прилади та методи вимірювання механічних величин». – Національний авіаційний університет, Київ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – 2019.

У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше запропонована нова технологія побудови приладів для вимірювання механічних величин роботи з інтелектуальними датчиками на базі TEDS, яка дає змогу підвищити метрологічні характеристики приладової системи в порівнянні з існуючими та розроблено метод оцінювання динамічних невизначеностей, в основі якого є визначення амплітудного значення динамічної невизначеності на основі сукупності амплітудо–частотної та фазо–частотної характеристики розробленого засобу вимірювання напруження та спектральної щільності сигналу, що дає змогу підвищити точність вимірювання.
2. Вперше розроблено метод автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено–деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків, який на відміну від існуючих, дозволяє більш ефективно коригувати похибки вимірювального каналу та розроблено метод корекції інструментальної випадкової похибки, зумовленої неідеальністю активних компонентів, опору ліній зв'язку та аналогових комутаторів при дистанційному вимірюванні тензодатчиком на основі

математичних моделей метрологічних характеристик, які являють собою низькочастотні корельовані шуми.

3. Дістали подальший розвиток теоретичні основи аналізу приладової системи на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено–деформований стан складних конструкцій, що дають можливість визначити коригуючі параметри при використанні поліноміальних залежностей від п'ятого до дев'ятого порядку.
4. Дістали подальший розвиток теоретичні основи розробки приладових систем для вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій, у тому числі удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану.
5. Удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій та розроблено методику вимірювання напружень та деформацій з врахуванням структури сенсорного елемента датчика і температурного коефіцієнта опору тензорезисторів, що забезпечує ефективну лінеаризацію та корекцію, підвищує точність вимірювання деформацій і напружень.
6. Удосконалено модель інтелектуального аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцією похибки від впливу різного роду дестабілізуючих факторів, зорієнтований на дистанційне вимірювання параметрів напружено–деформованого стану за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків з підвищеними техніко–економічними та метрологічними характеристиками, в структурі яких наявний вимірювальний підсилювач з диференційно–струмовими входами, що забезпечує підвищення коефіцієнту послаблення синфазних завад.

7. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу параметрів напружено–деформованого стану від завад нормального виду, у тому числі за умови не лінійності функції перетворення аналогового інтерфейсу, котрий на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищення точності вимірювань та покращення завадозахищеності аналогового інтерфейсу в умовах апроксимації нелінійних функцій перетворення вимірювальних сигналів.
8. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціально–струмовими входами для роботи з одноелементним тензодатчиком, де один із подільників утворений резистивним тензодатчиком, а сам вимірювальний підсилювач включає операційний підсилювач першого каскаду, виконаний за схемою інвертора струму, що дає можливість зменшити інструментальні похибки, зумовлені неідеальністю операційних підсилювачів, ліній зв'язку та аналогових комутаторів.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що:

1. На основі аналізу напружено–деформованих і граничних станів складних технічних конструкцій, комплексного аналізу динаміки навантаження та напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій запропоновано систему оцінювання ресурсу складних конструкцій.
2. Використання аналізу надійності та синтезу вимірювальної інформації про напружено–деформований стан складних конструкцій у практиці проектування складних конструкцій для вибору оптимального варіанту конструкції приладу, прогнозування граничного напружено–деформованого стану та відмов приладової системи.
3. Розроблено приладову систему вимірювань параметрів напружено–

деформованого стану складних технічних конструкцій, яка забезпечує високу точність і швидкодію дистанційних вимірювань напружень та деформацій.

4. Доведено ефективність розробленого методу вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій з урахуванням нового інформативного параметру, а саме корекції складової інструментальної похибки і визначено точність результатів вимірювань параметрів напружено–деформованого стану шляхом чисельного моделювання на ПК та експериментальних досліджень.
5. Доцільність побудови приладової системи вимірювань параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій з покращеними метрологічними характеристиками, а саме зменшено похибку вимірювання на 17%.
6. Розроблено методiku оптимізації аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних датчиків, яка дозволяє більш ґрунтовно підійти до питань врахування похибок аналогових інтерфейсів при вимірюванні напружено–деформованого стану. Такий підхід дозволяє більш точно врахувати всі складові похибки аналогового інтерфейсу.
7. Розроблено нову класифікацію методів вимірювання напружено–деформованого стану та класифікацію факторів, що впливають на вимірювання напружено–деформованого стану корпусу літака.
8. Розроблено алгоритми і процедури оцінювання характеристик точності вимірювання параметрів напружено–деформованого стану.

Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах: Державному підприємстві «Завод 410 цивільної авіації», Публічному акціонерному товаристві «Науково–виробниче об'єднання «Київський завод автоматики», приватному підприємстві «Фірма

«Валеан і К» (м. Рівне) та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті при викладанні дисциплін «Фізичні основи сучасної метрології», «Основи метрології та електричних вимірювань» за спеціальністю «Інформаційні вимірювальні системи».

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено патентом України №134572.

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми досліджень, показано зв'язок обраного напрямку з науковими темами, планами, програмами, сформульовано мету та задачі досліджень, подано наукову новизну отриманих результатів і їхнє практичне значення, перераховано підприємства та навчальні заклади, де було впроваджено теоретичні і практичні здобутки роботи, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації за темою дисертаційної роботи та використання результатів досліджень.

В **першому** розділі здійснено аналіз методів вимірювання механічних напружень, розроблено відповідну класифікацію, згідно якої на сьогоднішній день найбільш поширеними методами вимірювання є ультразвуковий, термопружний та магнітопружний методи вимірювання механічних напружень. Аналіз існуючих засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану показав, що для складних конструкцій в експлуатаційних умовах найбільш широкого застосування набув метод із застосуванням дискретних металевих і напівпровідникових тензорезисторів та тензодатчиків.

Основними дестабілізуючими факторами, які обмежують точність вимірювання за допомогою тензодатчика, є випадкові процеси, а саме: шуми, завади та ін., часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок фізичної деградації та старіння, а також впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів.

Доведено, що наукова проблема дисертаційних досліджень є

актуальною для різних галузей промисловості та народного господарства України, зокрема машинобудування, приладобудування, будівництва, транспортного, енергетичного, авіаційно – космічного комплексів тощо.

У **другому** розділі представлено результати теоретичних досліджень, спрямованих на розробку нових методів та засобів вимірювання напружень та деформацій у складних конструкціях в умовах нечіткої вхідної інформації та стохастичної невизначеності з використанням теоретичних положень теорії напружень та деформацій, метрології, теорії вимірювань, теорії надійності, теорії вірогідності та математичної статистики.

Здійснено комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено–деформованого стану, моделювання граничних і допустимих станів елементів конструкцій з врахуванням випадків вираженого циклічного пружно–пластичного деформування.

Розроблено математичну модель впливу негаусівських завад та розроблено нелінійний метод боротьби з негаусівськими завадами при отримуванні сигналу та обробці інформації засобами вимірювання на основі асимптотично оптимального прийому.

Запропоновано модель діагностики та визначення напружено–деформованого стану конструкцій на основі мостової вимірювальної схеми з тензорезисторами з диференціальною схемою підключення. Запропоновано методику розрахунку тензорезисторного датчика деформацій.

У **третьому** розділі розроблено структуру приладової системи вимірювання напружено–деформованого стану, в основі якої закладено модель автоматизованої системи діагностування.

Розроблено математичну модель вимірювання деформацій за допомогою тензорезисторних датчиків, що визначає взаємозв'язок між вихідним сигналом тензоперетворювача та механічним напруженням, яке виникає при деформації.

Розроблено модуль вимірювання напружено–деформованого стану на

базі аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультіплексора та резистивних тензодатчиків.

За допомогою програмного середовища NUMERY, було визначено регресійне рівняння функції перетворення вимірювального каналу, що дозволило визначити систематичні та випадкові складові похибки вимірювального каналу без врахування похибок датчика.

В **четвертому** розділі було розглянуто приладову систему вимірювання, у якій тензорезистори підключаються за мостовою схемою, що забезпечує усунення систематичних помилок вимірювання і компенсацію температурних деформацій.

Для корекції похибок датчиків що виникають внаслідок впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, зокрема температури, було застосовано метод автоматичної корекції на основі методів допоміжних вимірювань, які регламентуються міжнародним стандартом IEEE 1451.02, що передбачає використання множини функцій перетворень, декількох еталонних значень вхідної величини під впливом різних значень дестабілізуючого фактору (TEDS).

За допомогою програмного пакету NUMERY було отримано коефіцієнти лінійної регресії підсумкової похибки від температури.

Для автоматизованої перевірки запропонованої приладової системи був розроблена методика перевірки, в основу якої закладено метод каліброваних сигналів.

В **п'ятому** розділі було проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Реєстрація даних в ході випробовувань та обробка отриманої інформації здійснювалися за допомогою програмно-апаратного комплексу (приладової системи), створеного на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного

університету, здійснювалися на основі тензорезисторного способу вимірювання напружень.

Також були проведені дослідження щодо вимірювання та моніторингу напружено-деформованого стану складних металевих конструкцій за допомогою датчиків FBG. У даному дослідженні відповідно до отриманих значень показів датчиків та встановленої зміни довжини хвилі Брега за допомогою вимірювального модуля приладової системи було отримано інформацію щодо зміни температури та деформації.

В шостому розділі було здійснено обробку результатів вимірювання в умовах невизначеності. Запропоновано новий алгоритм вимірювання напружено – деформованого стану конструкції, що забезпечує високу точність і достовірність вимірювань завдяки розробленому методу гасіння завад при отриманні сигналу приладовою системою з застосуванням фільтра Калмана.

В загальних висновках підсумовано результати досліджень, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих в лабораторних умовах, що висвітлено у дисертаційній роботі.

Ключові слова: надійність, напруження, деформація, приладова система, моделювання напружень, аналоговий інтерфейс, дистанційне вимірювання, негаусівські завади, корекція температурної похибки, завадозахищеність, швидкодія вимірювання, метрологічні характеристики.

Список основних публікацій здобувача:

1. Кузьмич Л.В. Методи та засоби автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних конструкцій. [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков. – Київ: Інтерсервіс, 2019. – 147с. – ISBN 978-617-696-830-6.
2. L.Kuzmych. Study of the durability of reinforced concrete structures of engineering buildings [Text] / L.Kuzmych, V.Kvasnikov // Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 543, 2017, pp. 659-663, ISSN

2194-5357, DOI 10.1007/978-3-319-48923-0.

3. V.Babich. Estimation of flexures of the reinforced concrete elements according to the National Ukrainian & European standards [Text] / V.Babich, V.Dovbenko, L.Kuzmych, T.Dovbenko // MATEC Web of Conferences. Vol. 116, 02005 (2017), DOI: 10.1051/matecconf/201711602005.
4. L. Kuzmych. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems [Text] / L. Kuzmych; O. Kobylanskyi; M. Duk. // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High–Energy Physics Experiments, Vol. 10808, 2018, 108085J; doi: [10.1117/12.2501661](https://doi.org/10.1117/12.2501661).
5. Кузьмич Л.В. Підвищення експлуатаційної надійності гирлових споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Меліорація і водне господарство. – 2010. – Вип. № 98. – С. 345– 350.
6. Кузьмич Л.В. Експлуатаційні вимоги до забезпечення надійності осушувальних гідромеліоративних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник інженерної академії України. – 2010. – Вип. №3-4. – С. 141–144.
7. Кузьмич Л.В. Оцінка надійності осушувальних систем на прикладі «Головинської» осушувальної системи, яка знаходиться в Рівненській області Костопільському району [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. – 2013. – Вип. №4(64).– С. 78– 84.
8. Кузьмич Л.В. Оцінка технічного стану елементів осушувальної системи «Марининська» Березнівського району Рівненської області / Л.В. Кузьмич, Ю.В. Шекель // Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. – 2014. – Вип. №4(68). – С. 34– 42.
9. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції приладових систем вимірювання

- механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. №2. – С. 180 – 183. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33
10. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2016. – Вип. №1(8). – С. 95 – 99.
 11. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено – деформованого стану складних конструкцій в штатних і аварійних ситуаціях. [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. №3. – С. 154 – 157.
 12. Кузьмич Л.В. Методи обґрунтування структурно-функціонального аналізу та принципи побудови системи діагностування напружено–деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2017. – Вип. №2(11). – С. 85 – 89.
 13. Кузьмич Л.В. Аналіз наявних методів та засобів вимірювання механічних напружень складних технічних систем на прикладі гідротехнічних споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2017. – Вип. №5-1(67). – С.89-93.
 14. Кузьмич Л.В. Оцінка залишкового ресурсу складних технічних конструкцій в умовах малоциклової та багатоциклової втоми [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2018. – Вип. №1(81). – С. 205 – 211. <https://doi.org/10.31713/vt1201822>.
 15. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено–деформованого стану складних конструкцій в аварійних ситуаціях [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. №2. – С. 61 – 64.
 16. Кузьмич Л.В. Методика оцінювання ресурсу складних технічних

- об'єктів [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2018. – Вип. №2(82). – С. 240– 248.
17. Кузьмич Л.В. Сценарії виникнення та розвитку небезпечних станів складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2018. – Вип. №62. – С. 35 – 40.
 18. Кузьмич Л.В. Підходи щодо оцінювання ресурсу технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. №2(82). – С. 204 – 207. DOI:[https://doi.org/10.26642/tn-2018-2\(82\)-204207](https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-204207)
 19. Кузьмич Л.В. Аналіз вичерпування ресурсу складних потенційно небезпечних інженерних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. №3. – С. 184 – 187.
 20. Кузьмич Л.В. Комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено–деформованих станів складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. №4. – С. 47 – 50.
 21. Орнатський Д.П. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків [Текст] / Д.П. Орнатський, Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков. // Метрологія та прилади. – 2018. – Вип. №6(74). – С. 9 – 12.
 22. Кузьмич Л.В. Механічні впливи на надійність складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Технічні науки та технології. – 2018. – Вип. №4(14). – С. 28 – 33. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33.
 23. Орнатський Д.П. Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками [Текст] /Д.П. Орнатський, Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков // Метрологія та прилади.– 2019.– Вип. №1(75).–

С.31–36.

24. Кузьмич Л.В. Розробка способу та засобу вимірювань напружено–деформованого стану за допомогою тензодатчика [Текст] / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019.– Вип. №1. – С. 69 – 74.
25. Кузьмич Л.В. Модель діагностики та визначення напружено–деформованого стану в складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – Вип. №.2 – С. 7– 11.
26. Кузьмич Л.В. Синтез методу вимірювання напружено–деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2019. – Вип. №3(77). – С. 12 – 18.
27. Кузьмич Л.В. Оптимізація вимірювальних засобів напружено–деформованого стану за допомогою тензодатчиків [Текст] / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2019. – Вип. №3 (155). – С. 50 – 57.
28. Кузьмич Л.В. Оптимізація роботи приладової системи вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В.Кузьмич // Механіка гіроскопічних систем. – 2019.– Вип. №. 37– С. 112 – 120.
29. Патент №134572 (Україна), МПК G01R 21/00. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків [Текст] / В.П. Квасніков, Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський. – Реєстрац. номер заявки U 201812440. Опубліковано в бюлетені №10 від 27.05.2019.

SUMMARY

Kuzmych L.V. Methods and tools of measuring stresses and deformations of complex structures by instrument system. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in specialty 05.11.01 "Instruments and methods for measuring mechanical quantities". – National Aviation University, Kyiv. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". – 2019.

The following new scientific results are received in the dissertation:

1. For the first time, a new technology for the construction of devices for measuring mechanical values of working with intelligent sensors based on TEDs is proposed, which allows to improve the metrological characteristics of the instrument system in comparison with the existing ones, and a method of estimation of dynamic uncertainties, which is to determine the amplitude of the value of the total value, is developed. amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the developed means of measuring voltage and spectral density of the signal, which gives much increase accuracy.
2. For the first time the method of automatic non-breaking correction of systematic component of error of remote measurement of stress - strain state on the basis of analog interfaces for strain gauges is developed. , resistance of communication lines and analog switches at remote measurement of the strain gauge based on mathematical model and metrological characteristics, which are low-frequency correlated noises.
3. Theoretical foundations of instrument system analysis on the basis of system approach and synthesis of measuring information on stress - strain state of complex structures, which allow to determine corrective parameters using polynomial dependencies from fifth to ninth order, have been further developed.
4. Theoretical foundations for the development of instrument systems for

measuring the stress - strain state of complex technical structures have been further developed, including the mathematical model of the process of remote measurement of the parameters of the stress - strain state, and a method for measuring the deformations and stresses taking into account the structure of the sensor element resistance of strain gauges, which enables efficient linearization and correction, and provides improved accuracy and measurement of deformations and stresses.

5. The mathematical model of the process of remote measurement of the parameters of stress - strain state of complex technical structures is improved, and the method of measuring deformations and stresses taking into account the structure of the sensor element of the sensor and the temperature coefficient of resistance of the strain gauges, which allows to carry out effective linearization and ensure the deformation and stresses.
6. Improved model of analog interface for remote measurements of signals of strain gauges with automatic error correction under the influence of various destabilizing factors, focused on the remote measurement of parameters of stress - strain state with the help of multiplexer and resistive strain gauges with technical features with differential current inputs, which increases the attenuation coefficient of the village nfaznyh noise.
7. The method and advanced means of protection of the measuring channel of parameters of stress - strain state from interferences of the normal kind, including provided that the function of analog analogue conversion, which, unlike the existing methods, provides improvement of measurement accuracy and improved interference, have been further developed. analog interface in the conditions of approximation of nonlinear functions of transformation of measuring signals.
8. The mathematical model on the basis of a measuring amplifier with differential current inputs for work with a single element load cell is improved, where one of the dividers is formed by a resistive strain gauge, and

the measuring amplifier itself includes an operational amplifier of the first cascade, made according to the inverter circuit, capable of switching the inverter circuit. due to the non-ideality of operational amplifiers, communication lines, and analog switches.

The practical significance of the results of the dissertation is that:

1. On the basis of analysis of stress - strain and boundary states of complex technical structures, complex analysis of load dynamics and stress - strain state of complex technical structures, a system of estimating the life of complex structures is proposed.
2. The use of reliability analysis and synthesis of measuring information on stress - strain state of complex structures in the practice of designing complex structures to choose the optimal variant of the device design, prediction of boundary stress - strain state and failures of the instrument system.
3. An instrumental system for measuring the parameters of the stress - strain state of complex technical structures has been developed, which provides high accuracy and speed of remote measurements of mechanical quantities.
4. The efficiency of the developed method of measuring the parameters of the stress - strain state of complex technical structures with the consideration of a new informative parameter, namely the correction of the component instrumental error, is proved, and the accuracy of the results of measurements of the parameters of the stress - strain state by numerical simulation on PC and experimental researches is determined.
5. The expediency of constructing an instrument system for measuring the parameters of stress - strain state of complex technical structures with improved metrological characteristics, namely, the measurement error is reduced by 17%.
6. The technique of optimization of the analog interface for remote measurements with the help of multiplexer and resistive sensors has been

developed, which allows to take a more thorough approach to the issues of taking into account the errors of analog interfaces when measuring the stress - strain state. This approach allows for a more accurate account of all the constituent errors of the analog interface.

7. A new classification of methods of stress-strain state measurement and classification of factors affecting the measurement of stress-strain state of an aircraft body have been developed.
8. Algorithms and procedures of estimation of characteristics of accuracy of measurement of parameters of stress - strain state are developed.

Theoretical and practical achievements of the work were implemented at the following enterprises: State Enterprise Plant 410 Civil Aviation, Public Company “Scientific and Production Association “Kyiv Automation Plant”, Private Enterprise “Firm “Valean & K” (Rivne) and into the process for teaching the disciplines “Physical basics of modern metrology”, “Fundamentals of metrology and electrical measurements” in the specialty “Information measuring systems” at the National Aviation University.

The scientific novelty and practical importance of the results of the work was confirmed by the patent of Ukraine No. 134572.

The **introduction** substantiates the relevance of the research problem, shows the connection of the chosen direction with the scientific programs, plans, topics, formulated the purpose and tasks of the research, presents the scientific novelty and practical significance of the obtained results, determined the personal contribution of the applicant, provides data on the approbation, publications on the topic of the dissertation work and use of research results.

The **first** section analyzes the methods of measuring mechanical stresses, and develops an appropriate classification according to which the most common methods of measurement are ultrasonic, thermoplastic and magnetoelastic methods for measuring mechanical stresses. Analysis of the existing means of

measuring the parameters of the stress - strain state showed that for complex structures in operating conditions the most widely used method was obtained with the use of discrete metal and semiconductor strain gauges and strain gauges.

The main destabilizing factors that limit the accuracy of the measurement using a strain gauge are random processes, such as noise, obstacles, etc., temporal changes in the parameters of the measuring transducers due to physical degradation and aging, as well as the effects of external climatic and mechanical factors.

It is proved that the scientific problem of dissertation researches is actual for various branches of industry and national economy of Ukraine, in particular mechanical engineering, instrument making, construction, transport, energy, aviation - space complexes, etc.

The **second** section presents the results of theoretical studies aimed at the development of new methods and means of measuring stresses and deformations in complex structures in the context of fuzzy input information and stochastic uncertainty using the theoretical provisions of stress and strain theory, metrology, theory of measurements, theory of measurements mathematical statistics.

A complex analysis of the dynamics of loading and stress - strain state, modeling of boundary and allowable states of structural elements taking into account the cases of pronounced cyclic elastic - plastic deformation is carried out.

A mathematical model of the influence of non-Gaussian interference was developed and a nonlinear method of combating non-Gaussian interference in signal acquisition and information processing by means of measurement based on asymptotically optimal reception was developed

The model of diagnostics and determination of stress - strain state of structures on the basis of the bridge measuring circuit with strain gauges with differential circuit is offered. The method of calculation of strain gauge strain sensor is proposed.

In the **third** section, the structure of the instrument system for measuring

the stress - strain state is developed, which is based on the model of the automated system of diagnosis

A mathematical model of deformation measurement using strain gauges has been developed, which determines the relationship between the output signal of the strain transducer and the mechanical stress that occurs during deformation.

The module of measurement of stress - strain state on the basis of analog interface for remote measurements using the multiplexer and resistive strain gauges is developed.

Using the NUMERY software environment, the regression equation of the measurement channel conversion function was determined, which allowed us to determine the systematic and random components of the measurement channel errors without taking into account the sensor errors.

In the **fourth** section, a measuring system was considered, in which strain gauges are connected by a bridge circuit, which eliminates systematic measurement errors and compensates for temperature deformations.

To correct the errors of sensors arising from the effects of various destabilizing factors, in particular temperature, used methods of automatic correction based on methods of auxiliary measurements, which are regulated by the international standard IEEE 1451.02, which involves the use of many functions of transformations, several influences of significant values and values of (TEDS).

Using NUMERY, we get linear regression coefficients of the total temperature error

In the **fifth** section, experimental studies were conducted in the laboratory, based on the Department of Computerized Electrical Systems and Technologies of the National Aviation University.

The data registration during the tests and the processing of the obtained information were carried out with the help of a software-hardware complex (instrument system), created on the basis of the Computerized Electrical Systems

and Technologies Department of the National Aviation University.

The tests were performed on the basis of the strain gauge method for measuring voltages.

In the **sixth** section, the measurement results were processed under uncertainty.

The **general conclusions** summarize the main results of the research conducted in the dissertation, both theoretical and experimental, obtained in the laboratory.

Keywords: reliability, stress, deformation, instrument system, stress simulation, analog interface, remote measurement, non-Gaussian interference, temperature error correction, noise immunity, measurement speed, metrological characteristics.

List of the main publications of the applicant:

1. Kuzmych L.V. Methods and means of automatic control and measurement of parameters of stress - strain state of complex structures. [Text] / L.V. Kuzmich, V.P. Kvasnikov. - Kiev: Interservice, 2019. - 147p. - ISBN 978-617-696-830-6.
2. L.Kuzmych. A study of the durability of reinforced concrete structures of engineering buildings [Text] / L.Kuzmych, V.Kvasnikov // Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 543, 2017, pp. 659-663, ISSN 2194-5357, DOI 10.1007 / 978-3-319-48923-0.
3. V.Babich. Estimation of flexures of reinforced concrete elements according to the National Ukrainian & European standards [Text] / V. Babich, V.Dovbenko, L.Kuzmych, T.Dovbenko // MATEC Web of Conferences.Vol. 116, 02005 (2017), DOI: 10.1051 / matecconf / 201711602005.
4. L. Kuzmych. Current state of tools and methods of deformation control and mechanical stresses of complex technical systems [Text] / L. Kuzmych; O. Kobylanskyi; M. Duk. // Photonics Applications in Astronomy,

- Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Vol.10808, 2018, 108085J; doi: 10.1117 / 12.2501661.
5. L.V. Kuzmych. Improvement of operational reliability of mouth structures [Text] / L.V. Kuzmic // Reclamation and water management. - 2010. - №98. - pp. 345 - 350.
 6. L.V. Kuzmych. Operational requirements to ensure the reliability of drainage systems [Text] / L.V. Kuzmych // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2010. - №3-4. - pp. 141 - 144.
 7. Kuzmych L.V. Estimation of the reliability of the drainage systems on the example of "Golovinsky" drainage system, located in the Rivne region Kostopil district [Text] / L.V. Kuzmych // Bulletin of the National University of Water and Nature Management: Collection of scientific papers. - 2013. - No. 4 (64). - P. 78– 84.
 8. Kuzmych L.V. Assessment of the technical condition of the elements of the drainage system "Maryninska" in the Bereznivsky district of Rivne region / L.V. Kuzmych, Yu.V. Shekel // Bulletin of the National University of Water and Nature Management: Collection of scientific papers. - 2014. - No. 4 (68). - P. 34– 42.
 9. L.V. Kuzmich. Current Trends in Instrumentation Systems for Measuring Mechanical Values [Text] / L.V. Kuzmich // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2016. - №2. - P. 180 - 183. DOI: 10.25140 / 2411-5363-2018-4 (14) -28-33
 10. L.V. Kuzmch. Current tendencies of creation of instrumental systems for measuring mechanical quantities [Text] / L.V. Kuzmich // Proceedings of the Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality. - 2016. - No. 1 (8). - P. 95 - 99.
 11. Kuzmych L.V. Analysis of stress - strain state of complex structures in regular and emergency situations. [Text] / L.V. Kuzmich // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2017. - №3. - P. 154 - 157.

12. Kuzmych L.V. Methods of substantiation of structural-functional analysis and principles of construction of the system of diagnosing the stress-strain state of complex structures [Text] / L.V. Kuzmych // Proceedings of the Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality. - 2017. - No. 2 (11). - P. 85 - 89.
13. L.V. Kuzmych. Analysis of the available methods and means of measuring mechanical stresses of complex technical systems on the example of hydraulic structures [Text] / L.V. Kuzmych // Metrology and devices. - 2017. - No. 5-1 (67). - P.89-93.
14. L.V. Kuzmych. Estimation of residual life of complex technical structures in conditions of low-cycle and multi-cycle fatigue [Text] / L.V. Kuzmych, A.A. Kuzmych // Bulletin of the National University of Water and Nature Management: collection of scientific papers. - 2018. - No. 1 (81). - pp. 205 - 211. <https://doi.org/10.31713/vt1201822>.
15. L.V. Kuzmych. Analysis of stress - strain state of complex structures in emergency situations [Text] / L.V. Kuzmych // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2018. - №2. - pp. 61 - 64.
16. Kuzmych L.V. The technique of estimating the resource of complex technical objects [Text] / L.V. Kuzmych, A.A. Kuzmych // Bulletin of the National University of Water and Nature Management: collection of scientific papers. - 2018. - No. 2 (82). - P. 240–248.
17. Kuzmych L.V. Scenarios of occurrence and development of dangerous states of complex technical systems [Text] / L.V. Kuzmych // Proceedings of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv. - 2018. - №62. - P. 35 - 40.
18. L.V. Kuzmych. Approaches to Evaluating the Resource of Technical Objects and Systems [Text] / L.V. Kuzmych // Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences. - 2018. - No. 2 (82). - P. 204 - 207. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-2\(82\)-204-207](https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-204-207)

19. L.V. Kuzmych. Analysis of resource depletion of complex potentially dangerous engineering structures [Text] / L.V. Kuzmych // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2018. - №3. - pp. 184 - 187.
20. L.V. Kuzmych. Comprehensive analysis of load dynamics and stress - strain states of complex technical systems [Text] / L.V. Kuzmych // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2018. - №4. - P. 47 - 50.
21. Ornatsky D.P. Analog interface for remote measurement using multiplexer and resistive strain gauges [Text] / D.P. Ornatsky, L.V. Kuzmych, V.P. Kvasnikov // Metrology and devices. - 2018. - No. 6 (74). - pp. 9 - 12.
22. Kuzmych L.V. Mechanical influences on the reliability of complex technical systems [Text] / L.V. Kuzmych // Engineering sciences and technologies. - 2018. - No. 4 (14). - P. 28 - 33. DOI: 10.25140 / 2411-5363-2018-4
23. Ornatsky D.P. Analog interface modeling for multichannel remote measurements with resistive strain gauges [Text] / D.P. Ornatsky, L.V.Kuzmych, V.P. Kvasnikov. // Metrology and devices. . - 2019. - №1 (75). - P. 31 - 36.
24. L.V. Kuzmych. Development of a method and means for measuring stress - strain state using a strain gauge [Text] / L.V. Kuzmich, D.P. Ornatsky, V.P. Kvasnikov // Bulletin of Cherkasy State Technological University. Series: Technical Sciences. - 2019. - №1. - pp. 69 - 74.
25. L.V. Kuzmych. Model of diagnosis and stress-strain state in complex structures [Text] / L.V. Kuzmich // Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine. - 2019. - No.2 - pp. 7-11.
26. L.V. Kuzmych. Synthesis of the method of measurement of stress - strain state of complex structures [Text] / L.V. Kuzmich // Metrology and devices. - 2019. - No. 3 (77). - pp. 12 - 18.
27. Kuzmych L.V. Optimization of measuring means of stress - strain state using strain gauges [Text] / L.V. Kuzmych, D.P. Ornatsky, V.P. Kvasnikov // Aerospace Engineering and Technology. - 2019. - No. 3 (155). - P. 50 - 57.

28. Kuzmych L.V. Optimization of the instrument system for measurement of stress - deformed condition of complex technical objects and systems [Text] / L.V. Kuzmych // Mechanics of Gyroscopic Systems. - 2019. - No. 37– P. 112 - 120.
29. Patent No. 134572 (Ukraine), IPC G01R 21/00. Analog interface for remote measurements using multiplexer and resistive strain gauges [Text] / V.P. Kvasnikov, L.V. Kuzmich, D.P. Ornatsky. - Registration. application number U201812440. Published in Bulletin No. 10 of 05/27/2019.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
SUMMARY.....	14
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	29
ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНО– ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	46
1.1 Аналіз літературних джерел щодо визначення фактичного стану складних технічних конструкцій, їх залишкового ресурсу та впливів на надійність.....	47
1.2. Аналіз методів та засобів визначення напружено– деформованого стану складних конструкцій.....	55
1.3. Аналіз дестабілізуючих факторів та фізичних процесів при вимірюванні напруження та деформацій тензометричним методом.....	79
1.4. Постановка наукової проблеми.....	92
Висновки по розділу 1.....	94
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ	96
2.1 Модель діагностики та визначення напружено–деформованого стану складних конструкцій.....	97
2.1.1. Сценарії виникнення та розвитку небезпечних напружено–деформованих станів та відмов у складних технічних конструкціях.....	100
2.1.2. Аналіз напружено–деформованих і граничних станів складних технічних конструкцій.....	105

2.1.3. Комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено–деформованого стану складних конструкцій...	111
2.1.4. Аналіз залишкового ресурсу складних технічних конструкцій	116
2.1.5. Побудова системи оцінювання ресурсу складних технічних конструкцій.....	122
2.2. Моделювання впливу негаусівських завад при вимірюванні	129
2.2.1. Оцінка завадостійкості асимптотично оптимального приймача.....	132
2.2.2. Вплив законів розподілу і характеристик завад на якість вимірювання.....	136
2.3. Модель діагностики та вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій.....	139
2.4. Математична модель вимірювання деформацій тензорезисторним датчиком	144
Висновки по розділу 2.....	147
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ ПОБУДОВИ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ.....	149
3.1. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин.....	150
3.2. Методологія побудови приладових систем вимірювання механічних величин.....	155
3.3. Структура приладової системи вимірювання напружено- деформованого стану.....	157
3.4. Принципи побудови та проектування вимірювання перетворень деформацій та напружень.....	165
3.5. Розробка модуля вимірювання напружено – деформованого стану конструкцій.....	168

	27
Висновки по розділу 3.....	182
РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЕФОРМАЦІЇ.....	184
4.1. Оптимізація вимірювальних засобів напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчиків.....	184
4.2. Цифрова корекція похибки вимірювання тензодатчика.....	193
4.3. Автоматизований моделюючий повірочний комплекс приладової системи.....	198
Висновки по розділу 4.....	215
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	217
5.1. Експериментальні дослідження тензорезисторного способу вимірювання.....	217
5.2. Експериментальні дослідження запропонованого способу вимірювання.....	224
5.3. Експериментальні дослідження електромагнітним методом при вимірюванні напружень в металевих конструкціях.....	228
5.4. Експериментальні дослідження методом FBG складних металевих конструкцій.....	234
5.4.1. Імовірнісне моделювання напружено-деформованого стану.....	241
5.4.2 Статистичний аналіз концентрації напруження.....	246
Висновки по розділу 5.....	249
РОЗДІЛ 6. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПРИЛАДОВИМИ СИСТЕМАМИ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ШВИДКОДІЇ.....	250
6.1. Обробка результатів вимірювання в умовах невизначеності.....	250

6.2. Непараметрична ідентифікація щільності розподілу імовірності в складній постійно змінній завадовій обстановці.....	261
6.3. Вимірювання механічних величин під дією негаусових завад....	263
Висновки по розділу 6.....	280
ВИСНОВКИ НА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ	281
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	284
ДОДАТКИ.....	311
ДОДАТОК А.....	312
ДОДАТОК Б.....	319
ДОДАТОК В.....	326
ДОДАТОК Д.....	327
ДОДАТОК Е.....	328
ДОДАТОК Є.....	329

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЗР	– аномально засмічений (бігаусівський) розподіл
АМПК	– автоматизований моделюючий повірочний комплекс
АОП	– асимптотично оптимальний приймач
АОПФП	– асимптотично оптимальний приймально-фільтруючий пристрій
АПС	– автоматизована приладова система
АСД	– автоматизована система діагностування
АЦП	– аналогово–цифровий перетворювач
БКІ	– Байєсівський критерій інформації
БМР	– бімодальний розподіл
БНЗ	– блок перетворення (гасіння) негаусівських завад
БП	– блок перетворення
БУ	– блок управління
ВП	– вирішальний пристрій
ВПр	– вимірювальний перетворювач
ГА	– генетичний алгоритм
ГР	– схема гальванічної розв’язки
ДЖ	– джерело живлення
ДМС	– детектор максимального сигналу
ДС	– дискретний сигнал
ЕМЗ	– електромагнітна завада
ЕП	– електронний підсилювач постійного струму
ЗВ	– засіб вимірювання
ІКПС	– інформаційно-керуюча приладова система
КЗ	– концентратор зв’язку
ККН	– коефіцієнт концентрації напруження

КП	– клавішний пристрій
КЩР	– кумулятивна щільність розподілу
ММК	– максимально можлива катастрофа
МПМ	– мікропроцесорний модуль
НДС	– напружено – деформований стан
НЕ	– навантажувальний елемент
ОВД	– одиниця відносної деформації ($1 \text{ ОВД} = 10^{-6}$)
ОД	– об’єкт діагностування
ПВВ	– пристрій вводу – виводу
ПВІ	– пристрій відображення інформації
ПВП	– первинний вимірювальний перетворювач
ПК	– персональний комп’ютер
РІ	– розподіл імовірностей
СЗД	– система збору даних
СТК	– складна технічна конструкція
ТКО	– температурний коефіцієнт опору
УГР	– узагальнений гаусівський розподіл
ФП	– функція правдоподібності
ФС	– пристрій формування сигналів
ЦАП	– цифро - аналоговий перетворювач
ЦВ	– цифровий вольтметр
ЧЕ	– чутливий елемент
ЩРІ	– щільність розподілу імовірностей
FBG	– fiber Brag grating (решітка Брега)

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасні світові тенденції розвитку науково-технічного прогресу висувають на передній план питання забезпечення належного технічного рівня, якості, ефективності та надійності роботи складних технічних конструкцій, яким властиві багатофункціональність, ієрархічність, складність. В свою чергу, підвищення якості, надійності складає невід'ємну частину об'ємної задачі підвищення рівня промислового виробництва та прискорення науково-технічного прогресу.

Складні технічні конструкції, до яких відносяться об'єкти гідротехнічного, нафтогазохімічного, транспортного, енергетичного, авіаційно-космічного комплексів, являють собою багатоконпонентні, просторово розподілені системи, які в процесі своєї експлуатації піддаються широкому спектру проектних, виробничих та експлуатаційних термомеханічних режимів навантаження, впливу агресивних полів і середовищ, антропогенному навантаженню і можуть досягати різних граничних станів, серед яких прийнято виділяти: руйнування, деформування, напруження, втрата стійкості, поява макротріщин, розгерметизація, зношення, корозія та інше.

Для складних технічних конструкцій характерні складні нелінійні взаємодії між складовими елементами та складні сценарії причинно-наслідкових зв'язків між небезпечними процесами та подіями впродовж експлуатації, що мають імовірнісний характер. Ці сценарії можуть реалізовуватися за складною розгалуженою сценарною схемою. Тому ключовим питанням стає вибір методики та засобів контролю та вимірювання параметрів напружено-деформованого стану складних технічних конструкцій, що дозволяють робити завчасне прогнозування розвитку працездатності конструкції, критичних режимів, станів тощо.

У відповідності до нормативних джерел напружено-деформований стан технічної конструкції – це сукупність внутрішніх напружень і

деформацій, що виникають при дії на дану конструкцію зовнішніх навантажень, температурних чинників та інших факторів.

Багатоваріантність механізмів контролю та вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій передбачає розвиток комплексних методів та сучасних засобів автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено–деформованого стану, використання яких дозволяє забезпечити з достатньо високою вірогідністю ідентифікацію небезпечних дефектів при різних режимах навантаження та механізми досягнення граничних станів.

З урахуванням вищевикладеного, засоби моніторингу, автоматичного контролю та вимірювання напружено–деформованого стану покликані знизити рівень невизначеності щодо стану конструкцій, а також слугуватимуть за основу для прийняття обґрунтованих рішень про можливість їхньої подальшої експлуатації, необхідності проведення планово–попереджувальних, капітальних та аварійних ремонтних робіт або заміни пошкоджених елементів чи реконструкції конструкції в цілому.

Огляд останніх досліджень показує, що найважливішу роль у забезпеченні якості та надійності складних конструкцій відіграє контрольно–вимірювальна апаратура та приладові системи, у яких особливе становище займають засоби вимірювання та контролю функціональних параметрів даних конструкцій.

В більшості вітчизняних та закордонних праць увага приділяється, в основному, вимірювальним системам різного типу, що дозволяють отримувати та накопичувати інформацію про параметри складної технічної системи з точнісними характеристиками вимірювальної приладової системи середнього класу, з застосуванням комп'ютерної корекції похибок, зберіганням даних про процес та результати вимірювання. Однак вимоги до точності вимірювання дистанційними приладовими системами призводить до необхідності удосконалення методів та засобів вимірювання напружено–

деформованого стану для отримання достовірних моделей отриманих значень з врахуванням умов експлуатації.

Тому в умовах сьогодення гостро постає питання про створення високоінтелектуальних приладових систем, що містять, на відміну від класичних приладових інформаційно–вимірювальних систем, базу даних, базу знань, обчислювально–вимірювальний комплекс з блоками автоматизованої перевірки та ін.

Питанням розробки методів, засобів та алгоритмів вимірювання механічних величин, зокрема параметрів напружено–деформованого стану, оптимізації процесів вимірювання, програмно–математичного забезпечення вимірювальних систем присвячені роботи відомих вітчизняних і зарубіжних вчених, зокрема Володарського Є.Т., Кухарчука В.В., Новікова О.М., Орнатського Д.П., Сіроджа І.Б., Туза Ю.М., Liu M., Kazeroni M. та інших. Значний вклад в області метрології, вимірювання механічних величин, теорії похибок внесли Бойчук Л.М., Коломієць Л.В., Гапшис А.А., Каспарайтис А.Ю., Раманаускас В.А., Самотокін Б.Б., Соколов В.І., Ющенко А.С., Юнгер І.Б., Vukobratovic M. та інші.

На сучасному етапі розвиток інформаційних технологій базується на застосуванні CALS- технологій, що пов'язані з життєвими циклами конструкцій та передбачає використання відповідних програмно-технічних систем. Основним середовищем для створення, збереження та обміну технічної документації є електронний простір.

Створення сучасних приладових систем контролю та визначення параметрів напружено–деформованого стану потребує вирішення багатьох комплексних наукових, організаційних та технічних проблем, вирішення яких можливе завдяки розвитку теоретичних основ, методів технічної кібернетики, системного аналізу і теорії прийняття рішень, штучного інтелекту, системотехніки, прикладної математики, інформатики, створення сучасних технічних засобів досліджень.

У галузі автоматизації технічних систем суттєві наукові та прикладні результати отримано Безвесільною О.М., Епштейном В., Жуком К.Д., Масловим В.П., Норенковим І.П., Петренком А.І., Семеновим О.І., Смирновим О.Л., Тимченком А.А. та іншими. Завдяки працям цих вчених створено нові напрями проектування сучасних систем, до яких увійшли цілі розділи з розвинутими методами досліджень: методи фізичного, геометричного і математичного моделювань. Віддаючи належне здобуткам дослідників, зауважимо, що, незважаючи на значний обсяг публікацій по даній тематиці, не було охоплено усієї множини питань таких складних та багатовимірних процесів, якими є проблеми автоматизації процесів контролю, діагностики, вимірювання, тому необхідні подальші наукові дослідження, які б ґрунтувались на теоретичних та практичних надбаннях учених та фахівців.

Таким чином, проблема точних вимірювань напружено-деформованого стану складних технічних конструкцій постає стратегічно важливою і актуальною для України. Тому постає питання необхідності вдосконалення сенсорних приладових систем вимірювання напружено-деформованого стану, розробки нових та удосконалення наявних методів і засобів вимірювання напружено-деформованого стану з покращеними метрологічними характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій, відповідно до Закону України № 3715-VI "Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні", зокрема, "Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки", а також у відповідності до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі № 125-ДБ17 "Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-

вимірювальних систем” (номер держреєстрації 0117U002367), де автор була виконавцем (розділи 2.4, 3.2).

Мета та задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка методів і засобів дистанційного вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій, що забезпечують підвищення точності та швидкодії, розширення функціональних можливостей та метрологічних характеристик шляхом розробки і застосування теоретичних основ і принципів побудови приладової системи для вимірювання напружено–деформованого стану на основі нового інтелектуального інтерфейсу.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання досліджень:

- дослідити та ідентифікувати параметри математичної моделі вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій, проаналізувати сучасний стан розвитку методів і засобів їх вимірювання та провести класифікацію існуючих методів вимірювання напружено–деформованого стану;
- розробити теоретичні основи побудови приладової системи для вимірювання напружено–деформованого стану складних конструкцій, в тому числі принципів побудови вимірювальних систем, методів та математичних моделей цієї системи;
- удосконалити методологію розв’язання проблеми підвищення точності вимірювання параметрів напружено–деформованого стану приладовою системою з покращеними метрологічними характеристиками, а саме підвищенням точності вимірювання, швидкодії та завадозахищеності на основі статистичних даних.
- розвинути теоретичні засади методів та способів дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану та проаналізувати способи підвищення їх метрологічних характеристик на базі розроблених математичних моделей метрологічних характеристик

засобів вимірювання та методів оцінювання характеристик точності вимірювань параметрів напружено–деформованого стану;

- удосконалити відомі методики, процедури, схеми метрологічної атестації засобів вимірювання параметрів напружено–деформованого стану з урахуванням концепції невизначеності вимірювання;
- проаналізувати систематичні, невилучені систематичні та методичні складові похибок засобів вимірювання параметрів напружено–деформованого стану та проаналізувати складові похибки первинних мікропроцесорних перетворювачів, на основі чого розробити нові більш ефективні математичні моделі та методики для визначення похибок, а також спосіб корекції температурної похибки тензодатчика та інструментальної похибки;
- розробити інтелектуальний інтерфейс для дистанційних вимірювань напружено–деформованого стану за допомогою мультиплексора при дії дестабілізуючих факторів та резистивних тензодатчиків, що забезпечить підвищення точності вимірювань та завадозахищеності, а також розробити математичні моделі попередньої обробки інформаційних сигналів при дистанційних вимірюваннях напружено–деформованого стану;
- провести експериментальні дослідження розроблених засобів вимірювання з метою підтвердження адекватності розроблених теоретичних моделей та ефективності запропонованих методів, а також створених на цій основі комп'ютеризованої приладової системи вимірювання напруження та деформації.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання напружень та деформацій за допомогою приладової системи, що реалізована на основі розроблених нових і удосконалених існуючих методів та засобів вимірювальної техніки.

Предметом дослідження є методи і засоби вимірювання напружень та деформацій складних конструкцій приладовою системою.

Методи досліджень

Методологічною основою дисертаційної роботи є застосування є застосування системно–спрямованого підходу та синергетичної концепції дослідження процесів і станів складних конструкцій, аналізу проблеми підвищення їх експлуатаційної надійності. Методологія та методи дослідження ґрунтуються на застосуванні теоретичних положень теорії напружень та деформацій та експериментальних методів дослідження напружено–деформованого стану, метрології, теорії вимірювань, теорії надійності, теорії вірогідності та математичної статистики. Обробка результатів теоретичних і експериментальних досліджень здійснювалася методами комп’ютерного моделювання та математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розв’язанні важливої науково–технічної проблеми, а саме розробки методів вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій та побудови інтелектуальної приладової системи вимірювання напружено–деформованого стану підвищеної точності, завадозахищеності та швидкодії з підвищеними метрологічними характеристиками, які, на відміну від відомих, враховують характер взаємодії датчика з об’єктом вимірювання, що реалізовано в отриманні автором особисто наступних наукових результатів:

1. Вперше запропонована нова технологія побудови приладів для вимірювання механічних величин роботи з інтелектуальними датчиками на базі TEDS, яка дає змогу підвищити метрологічні характеристики приладової системи в порівнянні з існуючими та розроблено метод оцінювання динамічних невизначеностей, в основу якого закладено визначення амплітудного значення динамічної невизначеності на основі сукупності амплітудо–частотної та фазо–частотної характеристики розробленого засобу вимірювання напруження та спектральної щільності сигналу, що дає змогу підвищити точність вимірювання.

2. Вперше розроблено метод автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено–деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків, який, на відміну від існуючих, дозволяє більш ефективно коригувати похибки вимірювального каналу та розроблено метод корекції інструментальної випадкової похибки, зумовленої неідеальністю активних компонентів, опору ліній зв'язку та аналогових комутаторів при дистанційному вимірюванні тензодатчиком на основі математичних моделей метрологічних характеристик, які являють собою низькочастотні корельовані шуми.
3. Дістали подальший розвиток теоретичні основи аналізу приладової системи на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено–деформований стан складних конструкцій, що дають можливість визначити коригуючі параметри при використанні поліноміальних залежностей від п'ятого до дев'ятого порядку.
4. Дістали подальший розвиток теоретичні основи розробки приладових систем для вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій, у тому числі удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану .
5. Удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій та розроблено методику вимірювання напружень та деформацій з врахуванням структури сенсорного елемента датчика і температурного коефіцієнта опору тензорезисторів, що забезпечує ефективну лінеаризацію та корекцію, підвищує точність вимірювання деформацій та напружень.
6. Удосконалено модель інтелектуального аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцію похибки від впливу різного роду дестабілізуючих факторів,

зорієнтований на дистанційне вимірювання параметрів напружено–деформованого стану за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків з підвищеними метрологічними та техніко–економічними характеристиками, структура яких містить вимірювальний підсилювач з диференційно–струмовими входами, що забезпечує підвищення коефіцієнту послаблення синфазних завад.

7. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу параметрів напружено–деформованого стану від завад нормального виду, у тому числі за умови не лінійності функції перетворення аналогового інтерфейсу, котрий, на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищення точності вимірювань та покращення завадо захищеності аналогового інтерфейсу в умовах апроксимації нелінійних функцій перетворення вимірювальних сигналів.
8. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціально–струмовими входами для роботи з одноелементним тензодатчиком, де один із подільників утворений резистивним тензодатчиком, а сам вимірювальний підсилювач включає операційний підсилювач першого каскаду, виконаний за схемою інвертора струму, що дає можливість зменшити інструментальні похибки, зумовлені неідеальністю операційних підсилювачів, ліній зв'язку та аналогових комутаторів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому що:

1. На основі аналізу напружено–деформованих і граничних станів складних технічних конструкцій, комплексного аналізу динаміки навантаження та напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій запропоновано систему оцінювання ресурсу складних конструкцій.
2. Використання аналізу надійності та синтезу вимірювальної інформації про напружено–деформований стан складних конструкцій у практиці проектування складних конструкцій для вибору оптимального варіанту

конструкції приладу, прогнозування граничного напружено–деформованого стану та відмов приладової системи.

3. Розроблено приладову систему вимірювань параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій, яка забезпечує високу точність і швидкодію дистанційних вимірювань напружень та деформацій.
4. Доведено ефективність розробленого методу вимірювання параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій з урахуванням нового інформативного параметру, а саме корекції складової інструментальної похибки і визначено точність результатів вимірювань параметрів напружено–деформованого стану шляхом чисельного моделювання на ПК та експериментальних досліджень.
5. Доцільність побудови приладової системи вимірювань параметрів напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій з покращеними метрологічними характеристиками, а саме зменшено похибку вимірювання на 17%.
6. Розроблено методику оптимізації аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних датчиків, яка дозволяє більш ґрунтовно підійти до питань врахування похибок аналогових інтерфейсів при вимірюванні напружено–деформованого стану. Такий підхід дозволяє більш точно врахувати всі складові похибки аналогового інтерфейсу.
7. Розроблено нову класифікацію методів вимірювання напружено–деформованого стану та класифікацію факторів, що впливають на вимірювання напружено–деформованого стану корпусу літака.
8. Розроблено алгоритми і процедури оцінювання характеристик точності вимірювання параметрів напружено–деформованого стану.

Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах: Державне підприємство «Завод 410 цивільної авіації»,

Публічне акціонерне товариство «Науково–виробниче об’єднання «Київський завод автоматики», приватне підприємство «Фірма «Валеан і К» (м. Рівне) та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті при викладанні дисциплін «Фізичні основи сучасної метрології», «Основи метрології та електричних вимірювань» за спеціальністю «Інформаційні вимірювальні системи», що підтверджено відповідними актами.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено патентом України №134572.

Особистий внесок здобувача

Основний зміст дисертаційної роботи та її результати відображені в опублікованих працях автора. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримано автором особисто. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використано ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально та моделюванням на ПК.

Особистий внесок здобувача у праці, опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації: [1] – здобувачем підготовлено розділи 3 та 4, а розділи 1 і 2 – спільно авторами; [2] – здобувачем запропоновано методику аналізу засобів вимірювання міцності та надійності складних технічних конструкцій, зокрема залізобетонних; [3] – здобувачем запропоновано методику оцінки вимірювання напружено – деформованого стану елементів складних технічних конструкцій з врахуванням міжнародних стандартів; [4] – здобувачем здійснено оцінку сучасного стану засобів та методів контролю, вимірювання деформацій та напружень в складних системах; [8] – здобувачем запропоновано метод оцінки технічного стану елементів складних конструкцій на основі теорії надійності із застосуванням системного підходу; [14] – здобувачем визначено задачі, які необхідно вирішувати при оцінці залишкового ресурсу з врахуванням невизначеності; [16] – здобувачем запропоновано математичну модель системи оцінки

фактичного стану технічної конструкції з врахуванням динаміки зміни вимірювальних механічних величин; [21] – здобувачем здійснено аналіз існуючих аналогових інтерфейсів та запропоновано удосконалену модель аналогового інтерфейсу на базі мультиплексора та резистивного тензодатчика; [23] – здобувачем розроблено математичну модель, що описує робочий цикл вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів та запропоновано рівняння, що описує скорегований результат вимірювання; [24] – здобувачем здійснено аналіз дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання тензодатчиком, визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному; [27] – здобувачем розроблено принципи побудови, проектування та математичного моделювання вимірювання деформацій і напружень приладовою системою; [29] – здобувачем запропоновано метод аналізу надійності елементів складних конструкцій на основі теорії надійності; [32] – здобувачем здійснено аналіз прототипів та запропоновано удосконалену модель аналогового інтерфейсу на базі мультиплексора та резистивного тензодатчика; [33] – здобувачем запропоновано метод аналізу надійності елементів складних конструкцій на основі теорії надійності; [34] – здобувачем розроблено перелік заходів, спрямованих на дотримання працездатного стану складних технічних систем в умовах експлуатації; [35] – здобувачем здійснено аналіз вимірювання механічних величин в сучасних інженерних системах; [36] – здобувачем проаналізовано сучасний стан вимірювання механічних величин та шляхи покращення енергокористування; [37] – здобувачем досліджено сучасний стан вимірювання механічних величин в області енергокористування; [38] – здобувачем досліджено методи вимірювання механічних величин; [42] – здобувачем здійснено аналіз сучасних засобів вимірювання механічних величин в умовах невизначеності; [43] – здобувачем проаналізовано методи та засоби вимірювання деформацій; [45] – здобувачем запропоновано методику оцінки гранично–напруженого стану у складних конструкціях; [49] – здобувачем розроблено теоретичні

основи побудови приладової системи вимірювання параметрів напружено–деформованого стану в складних конструкціях; [50] – здобувачем запропоновано методику оцінювання напружено–деформованого стану при багатоцикловій та малоцикловій втомі; [52] – здобувачем розроблено математичну модель, що описує робочий цикл вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів та запропоновано рівняння, що описує скорегований результат вимірювання; [55] – здобувачем розроблено математичну модель побудови приладової системи вимірювання напружено–деформованого стану.

Апробація результатів дисертації

Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на таких міжнародних наукових конференціях і семінарах: міжнародна науково-практична конференція «Социально–экономические и экологические проблемы сельского и водного хозяйства» (м. Москва, 2010); міжнародна науково–практична конференція молодих науковців, аспірантів та студентів «Інформаційно–обчислювальні технології, автоматика та електротехніка (ІТАЕ – 2016)»(м. Рівне, 2016); 10^а, 11^а міжнародна науково–практична конференція "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків 2016 р., 2018 р.); VII, VIII всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» (м. Київ 2016 р., 2018 р.); 3^а, 4^а міжнародна науково-технічна Internet–конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно–технічними та технологічними комплексами» (м. Київ 2016 р., 2017 р.); науково–практична конференція "Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель" (м. Київ 2017 р.); 9^а, 10^а, 11^а міжнародна науково–практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ 2016 р., 2017 р., 2018 р.); 4^а міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних

системах (ВКДТС-2017)» (м. Вінниця 2017 р.); 7^а, 8^а 9^а міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів 2017 р., 2018 р. 2019 р.); 13^а, 14^а міжнародна науково-технічна конференція “Авіа-2017” (м. Київ 2017 р., 2019 р.); міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій» (м. Рівне 2018 р.); VI международная научно-техническая Интернет-конференция «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» (м. Мінськ 2019 р.); 12^а міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (м. Київ 2019 р.); 14^а міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем (МОДС 2019)» (м. Чернігів 2019 р.).

Також результати дисертаційної роботи доповідались на всеукраїнських наукових конференціях, а також на семінарах кафедри комп’ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету.

Публікації

Основні положення дисертаційного дослідження опубліковані дисертантом самостійно та у співавторстві у 56 наукових працях, у тому числі в одній монографії (у співавторстві), 27 статей - у наукових фахових виданнях (з них 17 - одноосібних, а 12 статей опубліковано у закордонних виданнях та наукових фахових виданнях України, зареєстрованих у міжнародних наукометричних базах **Scopus** та **Index Copernicus**), 1 патент України та 27 публікації в інших виданнях (з них 11 - одноосібних), зокрема статті у інших виданнях та матеріали і тези доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 324 сторінки, з яких основна частина викладена на 306 сторінках, що вміщують

51 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел із 235 найменувань та додатків на 18 сторінках, що містять результати моделювання, апаратне та алгоритмічне забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБКИ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ТА МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

В розділі здійснено аналіз сучасних підходів до забезпечення якості складних конструкцій і встановлено, що розвиток наукових принципів та методології забезпечення якості складних конструкцій здійснюється на основі визначення та прогнозування їхньої надійності через ідентифікацію їхнього фактичного стану у тому числі завдяки відомостям про напружено–деформований стан.

В процесі експлуатації складні конструкції піддаються безперервним впливам, що призводять до виникнення та накопичення в елементах конструкцій пошкоджень та відмов. Встановлено, що найбільш складними та найменш дослідженими є механічні впливи, які значною мірою впливають на напружено–деформований стан конструкції, а відповідно, на граничний стан, залишковий ресурс тощо.

На сьогоднішній день є відомими і в достатній мірі описаними різні методи вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, однак, станом на сьогодні, відсутній їх комплексний огляд та аналіз з висвітленням переваг та недоліків. Тому задачами даного розділу є комплексний аналіз відомих методів і засобів вимірювання напружень та деформацій з розробкою відповідних класифікацій, систематизація основних технічних характеристик засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, а також якісний аналіз дестабілізуючих факторів на процес проведення вимірювань розглянутими методами.

В результаті проведеного аналізу було сформульовано наукову проблему дисертаційних досліджень і виділено область невирішених теоретичних та практичних питань, пов'язаних з методологією забезпечення надійності складних конструкцій на різних етапах їхнього життєвого циклу

через діагностику та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану елементів складних конструкцій сучасними приладовими системами.

1.1. Аналіз літературних джерел щодо визначення фактичного стану складних технічних конструкцій, їх залишкового ресурсу та впливів на надійність

Ідентифікація фактичного стану складних технічних конструкцій та споруд, їх напружено–деформованого стану, виявлення граничного стану, прогнозування динаміки зміни стану у процесі експлуатації, визначення їхнього залишкового ресурсу – усі ці завдання є складовими єдиної важливої проблеми: забезпечення експлуатаційної надійності конструкції.

Під експлуатаційною надійністю складних технічних конструкцій слід розуміти властивість конструкції зберігати у часі в чітких установлених межах значення усіх параметрів, які характеризують здатність даної конструкції виконувати покладені на неї функції в заданих режимах, умовах застосування чи експлуатації, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. Це визначення терміну, зазвичай, використовується для якісного опису властивостей надійності, а саме для безвідмовності, довговічності ремонтпридатності та збережуваності чи поєднання цих властивостей [1, 6-11].

Безвідмовність – це властивість конструкції виконувати покладені на неї функції за певних умов упродовж заданого інтервалу часу [1-5]. В основному, безвідмовність розглядається стосовно режиму роботи (дії, функціонування, застосування) конструкції [1, 12-16].

Довговічність – це властивість конструкції виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та планово–попереджувального ремонту [1-5]. В загальному випадку, довговічність конструкції вимірюється її технічним ресурсом або строком служби, і є обмеженою не відмовою, а переходом в граничний стан,

що означає, що необхідно проводити комплексний або середній ремонт, або взагалі неможлива подальша експлуатація конструкції. Лише для конструкцій, які не ремонтуються, відмова є одночасним переходом у граничний стан [1, 17-20].

Збережуваність – це властивість конструкції зберігати в заданих значеннях параметрів, що характеризують здатність конструкції виконувати потрібні функції під час і після зберігання та (чи) транспортування [1-5]. Зберігання і транспортування конструкції впливає на деякі важливі її характеристики функціонування [1, 21-23].

Основною метою експлуатації конструкції є отримання заданих результатів від її застосування. Тому надзвичайно важлива та складова збережуваності, яка обумовлює вплив збереження і транспортування на її наступну поведінку в робочому режимі. Таким чином, збережуваність зводиться до двох складових. Перша складова властивості обумовлює поведінку конструкції під час зберігання або транспортування, а друга – проявляється не через зміну поведінки конструкції, а під час застосування конструкції після її зберігання або транспортування. Ці зміни поведінки легко встановлюються, якщо порівняти поведінку двох груп однакових конструкцій, одна група яких до цього зберігалася або транспортувалася, а інша – використовується практично зразу після виробництва чи будівництва [1, 16-19].

Ремонтопридатність – це властивість конструкції бути пристосованою до підтримання та відновлення стану, в якому вона здатна виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту [1-5]. В загальному випадку ремонтпридатність – це поєднання технологічності для технічного обслуговування і ремонтної технологічності [6-9].

Ремонтопридатність визначає пристосованість конструкції не тільки до відновлення стану, а також до попередження виникнення відмов та пошкоджень. Відновлення нормального технічного стану конструкції здійснюється, в основному, під час її ремонту, а попередження порушень

цього стану – при технічному обслуговуванні. При нових ремонтах, як правило, здійснюють профілактичні заходи, а при технічному обслуговуванні інколи можуть виконувати відновлювальні роботи, хоча і у відносно невеликому обсязі [1, 10-13].

Ремонтопридатність може розглядатися як складна властивість, складові якої характеризують пристосованість конструкції до проведення в першому наближенні, окремо технічного обслуговування і ремонту, а при більш детальному розгляді – пристосованість до окремих типових технологічних операцій, зокрема ремонту, технічного обслуговування тощо. Тоді розглядають такі похідні властивості від ремонтпридатності, як контролепридатність, доступність для заміни окремих частин конструкції, їх легкозйомність, взаємозамінюваність тощо. Ремонтопридатність оцінюється за допомогою показників, які визначають розміром часу, роботи, коштів і матеріальних ресурсів, які необхідно витратити для ремонту чи технічного обслуговування [1, 5-9].

В свою чергу ці властивості в деяких випадках залежать від міцності, стійкості, відновленості, безпеки і інших більш простих властивостей. Спрощена схема співвідношення областей понять властивостей наведена на рис. 1.1 [1].

Аналіз простого співвідношення властивостей надійності показує, що надійність конструкції в цілому буде, в більшій мірі, характеризуватися найменшим значенням однієї із властивостей (рис. 1.1, *а*). Співвідношення різних властивостей надійності при їх взаємодії має комплексний характер (рис. 1.1, *б*) і не у всіх випадках може бути визначений через складність цієї взаємодії [1].

В процесі функціонування складні технічні конструкції піддаються безперервним впливам з постійним погіршенням їхнього технічного стану. Це обумовлено результатом впливу технологічних і зовнішніх експлуатаційних навантажень і ряду факторів навколишнього середовища, які носять випадковий характер [1, 7-9].

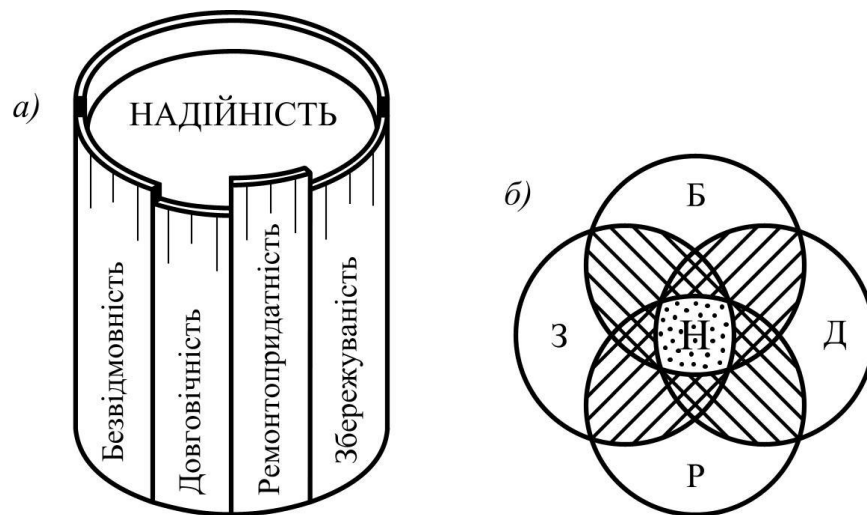


Рис. 1.1. Модель співвідношень властивостей надійності конструкції:
а – просте, б – комплексне.

Дані впливи ведуть до виникнення і накопичення в елементах технічних конструкцій різних видів пошкоджень $d(\tau)$ (знос, втома, фізичне старіння, поява тріщин і ін.). Досягнувши критичного рівня, накопичені в результаті процесу експлуатації пошкодження призводять до порушення працездатного стану обладнання, спрацювання та вичерпування ресурсу, і, як наслідок, до надзвичайних ситуацій (відмов, аварій та катастроф) [1].

Впливом називається будь-яка причина, в результаті якої в конструкції змінюються внутрішні напруження, деформації або інші параметри стану [1,7].

Крім того, для коректного якісного та кількісного аналізу надійності складних технічних конструкцій необхідно враховувати впливи, тобто будь-які причини, в результаті яких в конструкції змінюються внутрішні напруження, деформації або інші параметри стану [1, 9].

Вихідними даними для розрахунку є параметри об'єкта, які характеризують [1, 10-13]:

- впливи експлуатаційного середовища;
- властивості матеріалів;

- розміри, положення у просторі, умови закріплення конструкцій та їх елементів.

Ці параметри розглядаються, здебільшого, як випадкові величини, випадкові послідовності або випадкові процеси, а їх значення, закони розподілу, частотно-часові характеристики і правила врахування мінливості – встановлюються нормами проектування. Норми проектування конструкцій різного призначення з різних матеріалів повинні також враховувати можливу залежність вихідних даних від умов довкілля [1, 7, 10].

Механічні впливи, що враховуються в розрахунку безпосередньо, розглядаються як сукупність сил, прикладених до конструкції (навантаження), або як вимушені переміщення і деформації елементів конструкції. Інші впливи немеханічної природи (наприклад, впливи агресивного середовища), як правило, враховуються в розрахунку опосередковано [1, 10-13].

Залежно від причини виникнення впливи поділяються на основні та аварійні. Основні впливи є наслідками природних явищ або людської діяльності. Це можуть бути впливи від води чи температури на конструкцію, від технологічного маніпулювання режимом роботи конструкції тощо. Аварійні впливи є небажаними результатами людської діяльності (наслідками грубих помилок), або результатами несприятливого збігу обставин (до аварійних можуть бути віднесені і дуже рідкісні впливи природного походження такі, як навантаження від смерчів, цунамі, катастрофічних паводків тощо) [1, 13].

Залежно від зміни в часі впливи поділяються на постійні та змінні. Постійні впливи діють під час усього терміну експлуатації конструкції і їхні значення неістотно змінюються у часі. Змінні впливи характеризуються зміною значень у часі і їхніми значеннями не можна нехтувати [1, 10-13].

В залежності від характерної тривалості безперервної дії на конструкції T_d змінні навантаження поділяються на тривалі та короточасні. Тривалі впливи характеризуються тривалістю дії T_d , яка може наближатися до

встановленого терміну експлуатації T_{ef} конструкції. Короткочасні впливи характеризуються тим, що для них $T_d \ll T_{ef}$ і які, в свою чергу, можуть поділятися на повторні та епізодичні [1, 10].

В залежності від способу прикладання навантажень у просторі впливи можуть бути фіксованими або вільними. Фіксованими є такі впливи, що діють тільки на визначені місця конструкції. Вільними впливами розглядаються такі впливи, які можуть довільно розподілятися по конструкції у деяких заданих межах. Урахування вільних навантажень може бути зведене до розгляду низки комплексів фіксованих навантажень, одержаних шляхом фіксації можливого розподілу вільних навантажень у просторі [1, 15-19].

У більшості випадків вплив мінливості геометричних характеристик на надійність конструкцій є набагато меншим у порівнянні з впливом мінливості навантажень та технічних характеристик (фізико-механічних властивостей) матеріалів. У таких випадках геометричні характеристики розглядаються як детерміновані величини з номінальними значеннями, вказаними у проекті або наведеними в інших документах [1, 11].

На стадії проектування й виготовлення складних технічних конструкцій фізико-механічні характеристики матеріалів є визначеними та відображеними у сертифікатах відповідності. За таких умов визначення та оцінка початкового ресурсу міцності конструкції не складає труднощів, оскільки вона передбачена на стадії введення конструкції в експлуатацію та підтверджується передпусковими випробуваннями [1, 5-9].

Важливим моментом є визначення ресурсу впродовж експлуатації, особливо на завершальній стадії, коли незначна похибка у визначенні залишкового ресурсу може призвести до непередбачуваних обставин та наслідків з нанесенням чималих економічних, екологічних збитків та людських жертв.

При визначенні надійності конструкції, зокрема її залишкового ресурсу, необхідно врахувати основні вище перелічені фактори впливу, що діють

безпосередньо на саму конструкцію впродовж її експлуатації та змінюють фізико–механічні властивості матеріалу конструкції [22-25] (рис. 1.2).

З наведеної на рис. 1.2 блок-схеми видно, що основними факторами впливу, що призводять до зміни надійності, зокрема залишкового ресурсу, є:

- корозійні процеси;
- агресивне середовище;
- механічні впливи;
- температурні впливи;
- зміна просторового положення через просідання опор чи фундаментів, в результаті чого є перерозподіл напружень, що залежать як від власної ваги, так і зовнішнього навантаження;
- динамічні навантаження (вібрація, мало- та багатоциклові навантаження).

Вище перелічені фактори впливу викликають незворотні деградаційні процеси, в результаті чого відбувається зниження міцнісних характеристик конструкції, відбувається зміна фізико–механічних властивостей, що призводить до зміни робочих режимів функціонування споруди, а також сприяє виникненню пошкоджень, відмов, аварійних ситуацій.

Окрім того, дефекти, що виникають у процесі виробництва, будівельно-монтажних робіт та в процесі експлуатації, а також людський фактор (антропогенне навантаження) та стихійні лиха також є причинами виникнення пошкоджень, відмов та аварійних ситуацій складних технічних конструкцій.

Із усіх вище наведених впливів на надійність складних конструкцій найбільш складними та недослідженими є саме механічні впливи, дослідження яких дозволить нам здійснювати контроль за напружено–деформованим станом конструкції, вимірювати параметри напружено–деформованого стану, що дасть змогу на основі даної інформації виявляти дефекти та пошкодження, аналізувати рівень зміни залишкового ресурсу, прогнозувати потенційно небезпечні зміни циклів навантажень тощо.

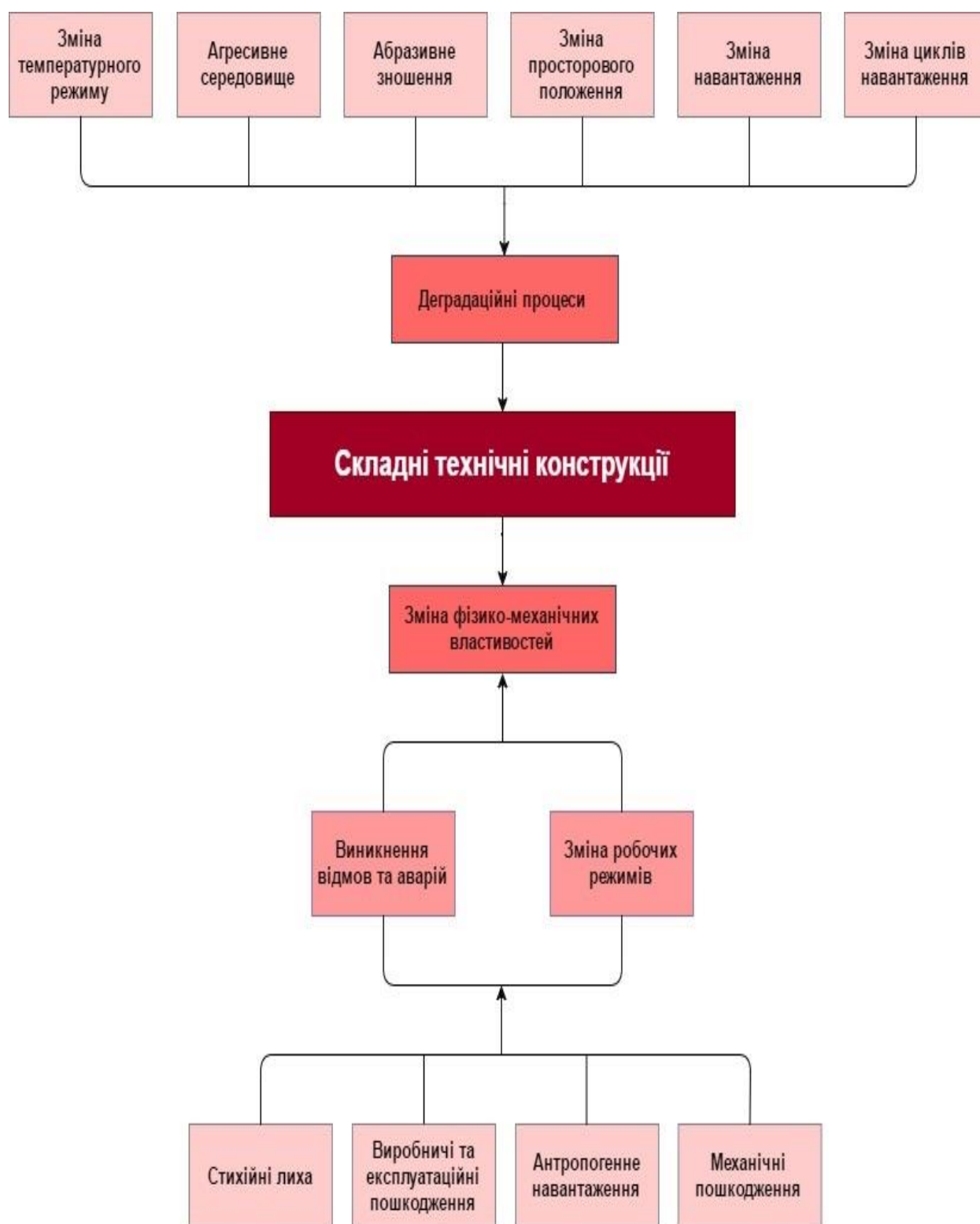


Рис. 1.2. Блок-схема аналізу факторів впливів на надійність складних технічних конструкцій

1.2. Аналіз методів та засобів визначення

напружено–деформованого стану складних конструкцій

Вибір експериментальних методів і засобів визначення деформацій і напружень у зв'язку із завданнями розрахунку на міцність, залежить від особливостей поставленої задачі та її складності, умов вимірювання та необхідної точності [30-35].

На сьогоднішній день відомі системи контролю та вимірювання загальної міцності складних технічних конструкцій, що базуються на наступних методах вимірювання механічних напружень (рис.1.3): руйнівних, малоруйнівних та неруйнівних [30-35].

Руйнівні методи вимірювання механічних напружень є найбільш точними, однак вони спричиняють повне або часткове руйнування конструкції. До них відносяться механічні методи випробування (випробування на розтяг, випробування на згин, метод визначення дійсного опору розриву, метод визначення границі плинності та ін.). Основним недоліком руйнівних методів є порушення цілісності конструкції, що при проведенні вимірюванні або контролю напружено–деформованого стану конструкцій у процесі їхньої експлуатації є недоцільним або технологічно не вигідним [30, 33].

Малоруйнівні методи базуються на використанні поверхневого шару об'єкта для порівняльного контролю напружень шляхом виконання отворів, надрізів, пропилів стовпчиків, канавок для контролю або заміру деформації, а також контролю твердості в зоні руйнування. Це спричиняє певні незручності, пов'язані із зупинкою технологічного обладнання та відновленням місць замірів. Тому застосування даних методів контролю в умовах експлуатації конструкцій є також економічно недоцільним та не вигідним [30, 33].

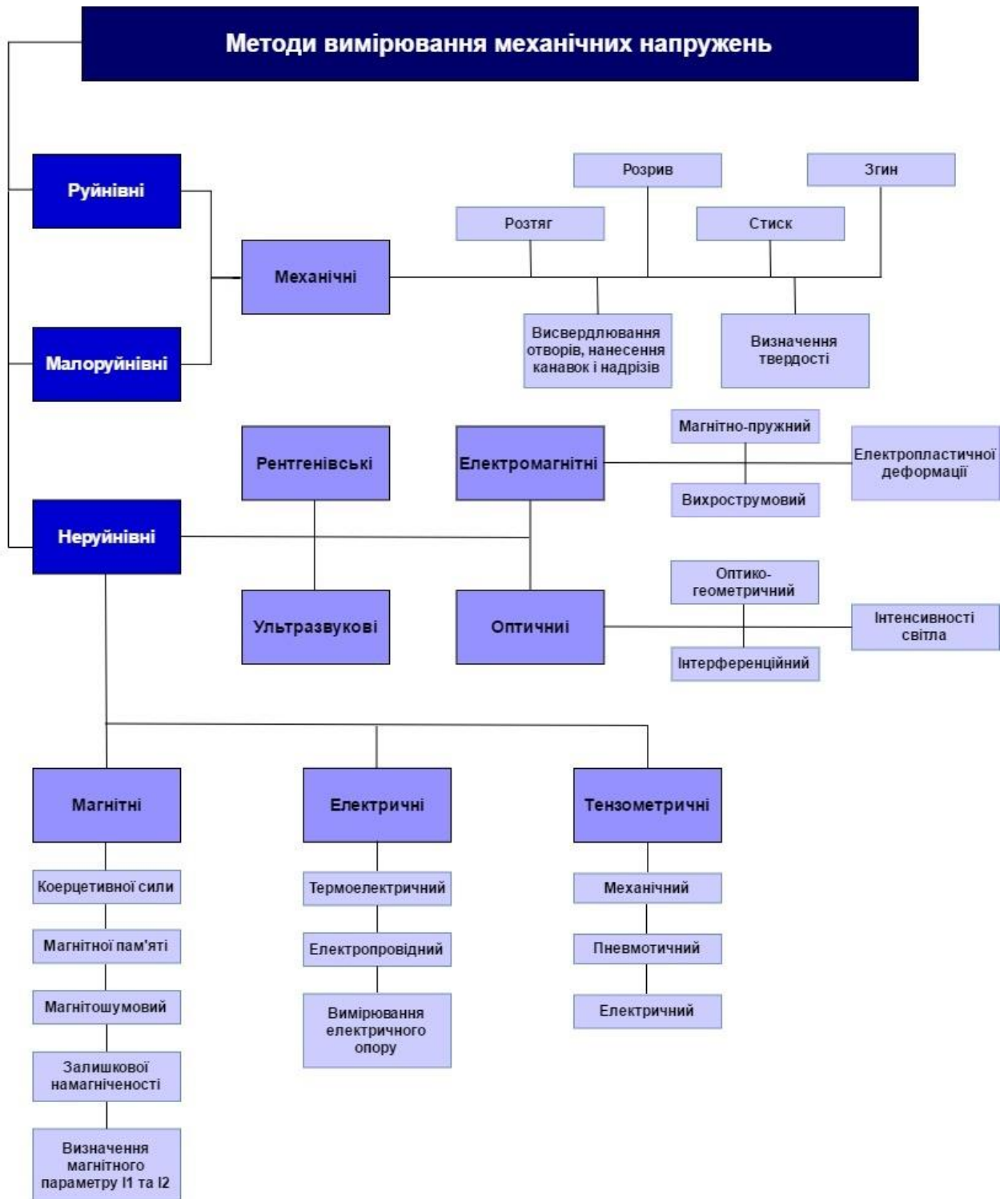


Рис. 1.3. Класифікація методів вимірювання механічних напружень

Неруйнівні методи визначення механічних напружень спрямовані на отримання інформативних параметрів, які є вихідними при розрахунку напружень та не спричиняють порушення цілісності конструкції. Вони засновані на зміні фізичних властивостей матеріалу залежно від рівня пружного деформування [33-36]. Саме тому для оцінки напружено–

деформованого стану складних конструкцій в процесі їхньої експлуатації найбільш доцільним є застосування саме неруйнівних методів контролю та вимірювання механічних напружень.

На сьогоднішній день відомі наступні методи вимірювань механічних напружень на основі неруйнівного методу визначення механічних напружень:

1. Ультразвуковий метод – дозволяє визначити величину напруження в матеріалі за умови відомих значень деяких фізичних констант матеріалу. Спосіб заключається у збудженні ультразвукових коливань на контрольованій ділянці і вимірюванні їхньої фази і амплітуди. В деяких випадках варіюють частоту коливань, добиваючись резонансу [30-35]. Окрім вимірювання механічних напружень, спосіб застосовується при контролі пластичної деформації [30, 31].

Значна кількість винаходів в даній області спрямована на підвищення точності вимірювання і на контроль пошкоджень при втомлюючому навантаженні [30, 31].

За допомогою сучасної технології ультразвукової томографії можна визначити просторовий розподіл механічних характеристик матеріалу, зокрема твердість, модуль Юнга та ін., внутрішніх напружень, міцнісних, технологічних та інших характеристик конструкції [36-40].

Для визначення міцнісних характеристик конструкційних матеріалів використовують явище акустичної емісії, тобто випромінювання матеріалом пружних хвиль, що викликане динамічною локальною перебудовою його внутрішньої структури [39-43]. Дослідження показали [44-46], що використання методу акустичної емісії в якості індикатора залишкової деформації дозволяє визначити межу пружності матеріалу з допуском 0,0005%.

Практично усі види ультразвукових методів залежать від чистоти та шорсткості контрольованої поверхні, від однорідності матеріалу та від впливу зовнішніх температур. Анізотропія механічних властивостей

суттєво впливає на швидкість пружних хвиль, що обмежує застосування методу, наприклад, у зварних конструкціях [30-35].

Основним недоліком даного методу (за винятком ЕМА-методу) є необхідність акустичного контакту датчика з поверхнею підконтрольного об'єкта, але на викривлених поверхнях та поверхнях, вкритих окалиною цього важко досягти [30, 31].

2. Рентгенівський метод – полягає в опроміненні поверхні конструкції, що вимірюється, електромагнітним випромінюванням рентгенівського діапазону вимірюванні інтенсивності розсіяного поверхнею випромінювання. Даний метод – не новий, давно відомий і має широке застосування в рентгеноструктурному аналізі та дозволяє вимірювати абсолютну величину напруження [30, 31].

Застосування даного методу у виробничих умовах стримувалося тривалий період у зв'язку з відсутністю достатніх за потужністю мобільних джерел рентгенівського випромінювання і відповідних чутливих реєстраторів. В останні десятиріччя дана проблема є достатньо вирішеною. В якості джерел випромінювання також використовуються радіоізотопи [30, 31].

Рентгенівська дифрактометрія є єдиним прямим методом неруйнівного контролю пружних деформацій та визначення напружень, що не вимагають попередніх даних про стан матеріалу і його елементний та фазовий склад. Вона забезпечує можливість визначення залишкових і діючих напружень в конструкціях при їх виготовленні, експлуатації та ремонті. На сьогоднішній день рентгенівська дифрактометрія реалізується на практиці такими приладами: «Компаратор», «Буля», РІКОР, розроблених компаніями ИРО та МИСиС. Рентгенівський дифрактометр РІКОР може послідовно визначати напруження в заданих напрямках, а також суму головних напружень в поверхневому шарі деталей та конструкцій [30, 31].

Недоліками даного методу є [30, 31]:

- невелика глибина проникнення рентгенівського випромінювання для портативних дефектоскопів (до 0,02мм);
- сильна залежність результатів вимірювання від температури матеріалу;
- шкідливий вплив іонізуючого випромінювання на працівників.

До основних недоліків рентгенівського вимірювання відносять його високу вартість в порівнянні із іншими методами та небезпечний вплив радіаційного випромінювання на робочий персонал та навколишнє середовище, понижена точність при роботі з сильно деформованими і грубозернистими матеріалами, а також неможливість одночасного визначення в декількох точках [30-35].

Похибка визначення напруження у виробничих умовах складає ± 10 МПа [30-31].

3. Електричний метод ґрунтується на визначенні параметрів електричного поля, що взаємодіє з об'єктом вимірювання або виникає в об'єкті вимірювання в результаті зовнішнього впливу. Електричний метод вимірювання поділяють на термоелектричний, електропровідний та вимірювання електричного опору [39].

Даний вид вимірювання є одним із основних неруйнівних методів, володіє високою чутливістю до змін фізико–механічних характеристик конструкції та використовується для дослідження процесів втомі матеріалу та визначення їх параметрів напруженого стану [39-42]. Джерелом інформації для вимірювань є термо-ЕРС. Існує доволі стійка кореляція між структурним станом, зокрема фазовим складом, твердістю, напруженнями та термо-ЕРС [43].

Для вимірювання величини термо-ЕРС найбільшого практичного застосування знайшли такі прилади, як ТМС-МП, ТСП-16, ТЭП-ЮК і ПКММ-2 [45].

Метод електропровідності заснований на зміні електропровідності, що реєструється шляхом її прямого вимірювання та вимагає апаратури з високою чутливістю [45].

Практично всі методи вимірювання електричного опору є обмеженими у використанні, оскільки їх використовують, переважно, на конструкціях невеликої товщини. Дані методи є довготривалими у вимірюванні і мають низьку точність [30, 31].

Похибка визначення не перевищує ± 10 МПа. Основна область застосування методу – вимірювання величини пластичної деформації при статистичному або циклічному навантаженні [30, 31].

4. Електромагнітний метод. До електромагнітних методів вимірювання напружено–деформованого стану конструкцій відносять вихрострумівий, магнітопружний та контроль електропластичної деформації [30, 31].

Визначення структурно-чутливих електричних і магнітних характеристик матеріалів або виробів за допомогою змінного магнітного поля складає основу електромагнітного, а саме вихрострумівого вимірювання напружено–деформованого стану. Даний метод базується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з вихровими струмами, що наводяться збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті вимірювання [39]. Для феромагнітних матеріалів величина вихрових струмів залежить від трьох параметрів, а саме: електропровідності, розмірів виробу та магнітної проникності, що є функцією напруженості поля намагнічування.

Відомий ряд приладів, що застосовуються у вимірюванні питомої електричної провідності, серед них ВЭ-26Н, ВЭ-17НЦ/3, ВЭ-17НЦ/4, ЭМИД, Eddyvisor, Magnaflux, Sigmatest 2.067, SigmascopeSMP1 та інші. Ці прилади дозволяють вимірювати питому електричну провідність з похибкою до 2% [32, 45-49].

Магнітопружний метод заснований на аналізі залежності магнітної проникності феромагнітних матеріалів від напруженого стану конструкції [31].

Використання магнітопружного ефекту для вимірювання механічних напружень. Відомо, що під дією механічних напружень (зовнішніх і внутрішніх), змінюються параметри кривої намагнічування і петлі гістерезису. При цьому змінюються магнітна проникність (початкова і максимальна), величини остаточної намагніченості, коерцитивної сили і магнітострикції, а також втрати енергії на перемагнічування і структура шумів Баркгаузена. Все це служить фізичною основою для розробки методів неруйнівного контролю величини і знаку механічних напружень [30, 31].

Відносна зміна магнітної проникності феромагнетику, обумовлена дією механічних напружень, визначається співвідношенням [30, 31]:

$$\mu_{\sigma} = \frac{\mu_r}{1 \pm \mu_r \lambda_0 \sigma / \pi}, \quad (1.1)$$

де μ_r та μ_{σ} - відносні магнітні проникності матеріалу (відповідно ненавантаженого та навантаженого феромагнетику); λ_0 - константа магнітострикції феромагнітного матеріалу.

В знаменнику знак «-» відповідає розтягу, знак «+» - стиску.

Вихідний сигнал перетворювача трансформаторного типу визначається залежністю:

$$E = \frac{4,44 \cdot f_H \cdot W_H \cdot I_H \cdot W_B}{Z_M + Z_G + R_{\Delta}}, \quad (1.2)$$

де W_B та W_H - число витків вимірювальної та намагнічувальної обмоток; I_H та f_H - величина і частота намагнічувального струму; Z_M та R_{Δ} -

магнітний опір магнітопроводу і повітряного зазору; Z_G - магнітний опір контрольованого об'єкта:

$$Z_G = \frac{l}{\mu_\sigma \mu_0 S}, \quad (1.3)$$

де l , S – відповідно ефективна довжина і площа перерізу підконтрольного матеріалу.

Аналіз співвідношень (1.1 – 1.3) показує, що за вихідним сигналом перетворювача можна визначити величину напружень, що діють в феромагнітних матеріалах. Однак загальний розрахунок вихідного сигналу перетворювача досить складний. Тому величина механічних напружень визначається (після оціночних розрахунків) за попередньо отриманими тарувальними залежностями [30, 31].

Магнітопружна пам'ять магнетиків та її використання для вимірювання силового впливу. Відомо, що намагнічений феромагнетик при механічному впливі втрачає свою залишкову намагніченість J_r [35]. В результаті відбувається магнітопружне розмагнічування. Аналогічним чином змінюється залишкова деформація механострикційної природи ε_r , що яскраво проявляється у високомагнітострикційних матеріалах, зокрема, на сплавах заліза з рідкоземельними металами [30, 31], що володіють гігантською магнітострикцією. Однозначність та повторюваність зміни J_r та ε_r в залежності від величини прикладених пружних напружень дозволили говорити про цей ефект як особливий вид пам'яті.

Відомо, що намагнічений феромагнетик при механічному впливі втрачає свою залишкову намагніченість J_r . В результаті відбувається п'єзодинамічне за термінологією або, по-іншому, магнітопружне розмагнічування. Аналогічним чином змінюється залишкова деформація

механострикційної природи ε_r , що яскраво проявляється у високомагнітострикційних матеріалах, зокрема, на сплавах заліза з рідкоземельними металами, що володіють гігантською магнітострикцією. Однозначність та повторюваність зміни J_r та ε_r в залежності від величини прикладених пружних напружень дозволили говорити про цей ефект як особливий вид пам'яті. На графіку залежності відносної зміни залишкової намагніченості J_r/J_0 від прикладання стискаючих напружень (рис.1.4) показано відносну зміну залишково-намагніченого зразка сплаву $TbFe_2$ після прикладання і зняття стискаючих напружень [70].

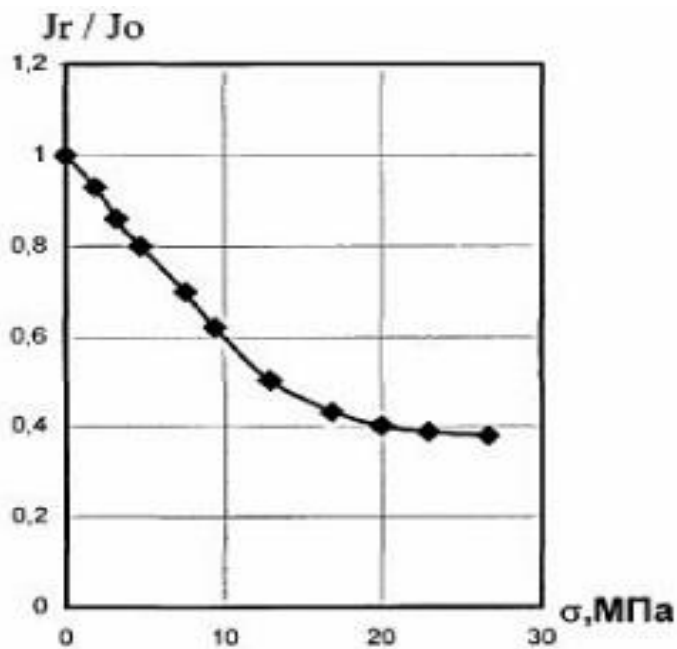


Рис. 1.4. Графік залежності відносної зміни залишкової намагніченості J_r/J_0 від прикладання стискаючих напружень для циліндричного зразка сплаву $TbFe_2$

З графіка видно, що вже при 20 МПа процеси п'єзодинамічного розмагнічування, в основному, закінчуються. Даний графік ілюструє також високу чутливість цього матеріалу до пружних напружень [70].

Дослідження залишкової намагніченості зразків сталей (30ХГС, 60Г, У8 і сталь 45), що пройшли закалювання і відпуск як після

одноразового навантаження (розтягу або стиску), так і по досягненню встановленого значення намагніченості в результаті багаторазових впливів. Залишкова намагніченість вимірювалася в розвантаженому стані ($\sigma = 0$). Результати вимірювання залишкової намагніченості J_r сталевих зразків після одноразового і багаторазових навантажень показано на рис. 1.5. (а, б) [70].

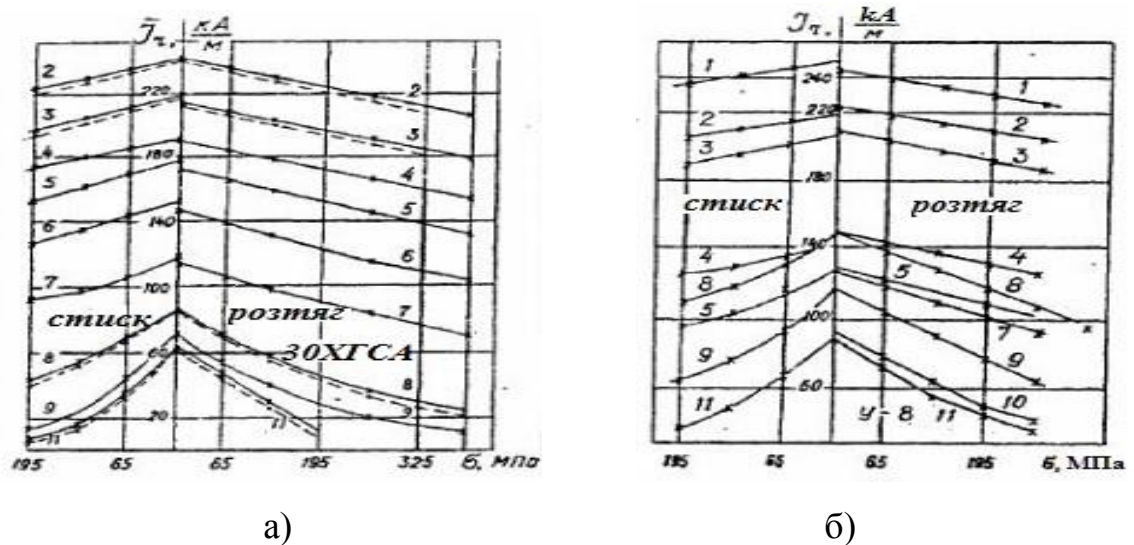


Рис. 1.5. Графіки залежностей остаточної намагніченості J_r від величини напруження і температури відпуску для сталей 30ХГСА (а) та У8А (б):

1 - закалювання; 2 - 150°C; 3 - 200°C; 4 - 250°C; 5 - 300°C; 6 - 350°C; 7 - 400 °C; 8 - 520°C; 9 - 600 °C; 10 - 650 °C; 11 - 7000 °C.

З графіків видно, що у сталей 30ХГС і У8 після закалювання і відпуску зростання напружень призводить до монотонного зниження залишкової намагніченості. Дослідження інших авторів показали, що розтяг і стиск неоднаковим чином позначається на намагніченості феромагнетика, поміщеного у магнітне поле [70].

Із отриманих результатів випливає, що розтяг і стиск призводять (в межах точності експерименту) до практично однакового характеру зміни залишкової намагніченості для закалених зразків, відпущених при низьких температурах. Для високо відпущених зразків в області

початкових навантажень зміна намагніченості є помітно більшою при стиску, ніж при розтягу [70].

Аналогічна картина спостерігається і на сталях 45 та 60Г. із збільшенням температури відпуску зміна J_r з навантаженням зростає все більше і змінюється не за лінійним законом (рис.1.5) [70].

Одним з перспективних методів вимірювання напруженого стану є метод електропластичної деформації. Суть даного методу полягає в додатковій дії на метал електричного струму, щільність якого перевищує деяке порогове значення. При цьому відбувається пружне розвантаження залишкових напружень в матеріалі. Це явище слугує основним способом неруйнівного визначення залишкових напружень. Однак, незважаючи на широке застосування електропластичної деформації, механізми, до яких відноситься дане явище, на сьогоднішній день до кінця не вивчені [39, 40].

Основним недоліком застосування електромагнітних методів є низька точність результатів вимірювання, оскільки локалізація потенційних дефектних ділянок конструкції можлива лише на поверхневих шарах матеріалу. Присутня також значна температурна і часова нестабільність, що зумовлена використанням параметричних накладних вихрострумів перетворювачів. Також одним із недоліків застосування даного методу є необхідність у ретельній підготовці місця вимірювання [40].

5. Магнітний метод вимірювання базується на закономірних зв'язках між структурним станом конструкції, хімічним та фазовим складом матеріалу, механічними характеристиками матеріалів з однієї сторони та магнітними властивостями – з іншої. Магнітні властивості матеріалу використовуються як індикатор зміни структурного стану, тобто індикатор механічних властивостей. Найбільш поширеними структурно-чутливими магнітними характеристиками, що застосовуються під час проведення магнітного вимірювання механічних напружень є

коерцитивна сила (параметри кривої гістерезису), магнітна проникність, залишкова індукція, намагніченість тощо [30, 31].

Використання коерцитивної сили як одного із магнітних параметрів для неруйнівного визначення механічних напружень було запропоновано порівняно недавно. Вимірювання коерцитивної сили здійснювалось наступним чином: вмикався і витримувався впродовж $0,1 \dots 1,0$ с постійний електричний струм в обмотках електромагніта. Цим самим забезпечувалось промагнічування матеріалу на глибину, рівну полюсу електромагніту. Процедура повторювалась три рази. Далі наступало автоматичне плавне розмагнічування зворотним струмом. Струм, що спрямовує залишкову намагніченість (магнітну індукцію) до нуля, під полюсами датчика–електромагніта (струм розмагнічування) пропорційний коерцитивній силі. Після градуювання приладу по еталонам можна вимірювати безпосередньо коерцитивну силу [30, 31].

Даний метод знайшов широке застосування завдяки високій чутливості значень коерцитивної сили до механічних напружень, структурних змін та фазових перетворень, достатній простоті і можливості проведення вимірювання в локальних ділянках конструкцій. Однак, навіть у випадках, описаних в інформаційно–довідковій літературі, коли відомий зв'язок коерцитивної сили з механічним параметром (твердістю, межею плинності, ударною в'язкістю, вмістом домішок та ін.), необхідно встановити можливість її використання при вимірюванні конкретних конструкцій в конкретних експлуатаційних умовах [40].

З приладової бази широкого застосування набули коерцитиметри із приставним електромагнітом, що є зручними у застосуванні [40]. Робота таких коерцитиметрів базується на використанні кореляції між струмом розмагнічування, що є пропорційним коерцитивній силі та окремими механічними властивостями об'єкта вимірювання.

Базовим приладом вимірювання є КРМ-Ц, на основі якого було розроблено комплекс стаціонарних та мобільних приладів, сучасними модифікаціями якого є: КРМ-Ц- КЗ, АММ, МФ-31КЦ тощо. Застосування методу коерцитивної сили передбачає і використання спеціального програмного забезпечення [81], що призначене для зберігання, систематизації, візуалізації та оперативного використання результатів вимірювань.

Магнітометричний метод вимірювання напружень заснований на реєстрації власних магнітних полів розсіювання, що виникають на обладнанні в локальних зонах концентрації напружень під дією робочих навантажень. При цьому величину магнітних полів розсіювання в об'єкті вимірювання відображає тензор деформації і напружень. Встановлено, що зміна залишкової намагніченості феромагнітних матеріалів пов'язана з максимально діючими напруженнями у конструкції [43].

З технічних засобів магнітного контролю широке застосування набув магнітний мультитестер ММТ-2. До переваг можна віднести можливість оцінки розподілу залишкових напружень в зонах концентрації без попередньої підготовки поверхні. Серед недоліків є необхідність додаткового використання методів неруйнівного контролю з метою встановлення точного виду дефекту і визначення його розмірів, вплив зовнішніх завад на результати вимірювань, а також можливість використання лише на феромагнітних матеріалах та низька достовірність результатів вимірювання [43].

Вимірювання за залишковою намагніченістю засновані на вимірюванні напруженості магнітного поля. Повністю намагнітити конструкцію великих розмірів доволі складно, тому часто намагнічують лише ділянку з допомогою постійного магніту або електромагніту. Серед приладів такого методу вимірювання найбільш широке застосування знайшов прилад ИМА-4. Основними недоліками методу є

можливість вимірювання лише в локальних ділянках конструкції і лише на матеріалах із феромагнітними властивостями, а також досить високий рівень похибок вимірювання [44].

Метод визначення ударної в'язкості шляхом вимірювання магнітошумового сигналу (визначення магнітного параметру $I-1$) базується на залежності зміни частоти електромагнітних коливань індуктивного магнітного контуру перетворювача від зміни ударної в'язкості металу конструкції. Метод контролю ударної в'язкості реалізується вимірюванням величини магнітошумового сигналу та визначенням залежності ударної в'язкості від характеристик магнітошумового сигналу на зразках конструкції, що піддаються деформаційному старінню з різним ступенем деформації. Формулу залежності частоти електромагнітних коливань індуктивного контуру перетворювача від ударної в'язкості елементів конструкцій визначають експериментально [44].

Недоліком даного методу є неможливість використання його у польових умовах, що значно обмежує спектр вимірювань, та робоча частота експериментальної установки не перевищує 10 МГц, що значно обмежує використання даного методу [44].

Метод визначення та контроль ударної в'язкості інформаційно-вимірювальною системою IBC-I2 (визначення магнітного параметру I_2) реалізується використанням інформаційно-вимірювальної системи IBC-I2, інформативним параметром якої є магнітний параметр I_2 , що характеризує зміну електромагнітних коливань в індуктивному контурі перетворювача. Параметр I_2 прямо залежить від зміни фізико-механічних характеристик матеріалу, оскільки параметри індуктивного контуру (кількість витків, матеріал осердя, зазор розімкнутого кільця), генератора коливань та відстань від індуктивного контуру перетворювача до елементу конструкції мінятися не будуть. Перевагами

даного методу є можливість проведення вимірювання у польових умовах на низьких напругах живлення (6В) [41].

6. До оптичних методів вимірювання відносяться: оптико-геометричний, інтерференційний, інтенсивності світла і ін [41, 42].

До оптико-геометричного вимірювання відносяться методи: дзеркально–оптичний, ділильних сіток, тіньових фігур (каустик), градієнтної фотопружності, муарових смуг тощо. Дія всіх цих методів базується на певних геометричних вимірюваннях, пов'язаних з відхиленням зондуючого променя від свого початкового положення внаслідок деформації конструкції. Найбільш широкого застосування набули методи тіньових фігур (каустик) і метод градієнтної фотопружності, оскільки вони є ефективними при визначенні напруженого стану та величин коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах тріщин [41, 42].

Інтерференційні методи вимірювання поділяються на оптико-когерентні і поляризаційно–оптичні [41, 42]. Найбільш точним методом вимірювання напружень із інтерференційних методів є спекл-інтерферометрія, що полягає у визначенні мікродеформацій на поверхні.

Поляризаційно–оптичні методи вимірювання напружень є одними з найбільш розвинутих методів для вирішення найбільш широких класів задач механіки шляхом оптичного моделювання. Дія даних методів вимірювання базується на властивостях деяких прозорих ізотропних матеріалів, що під навантаженням стають оптично-анізотропними і проявляють ефект подвійного променезаломлення. За допомогою поляризаційно–оптичного методу можна ефективно проводити оптичне моделювання розподілу напружень при певних навантаженнях об'єкта з метою оптимізації його форми, а також проводити вимірювання напруженого стану в конкретних точках конструкції. Даний метод

використовують для визначення напруженого стану поверхонь реальних натурних конструкцій [41].

7. Тензометричні методи є найбільш поширеними, в основі яких можна виділити механічну, електричну та пневматичну тензометрію.

У більшості механічних тензометрів деформація, що вимірюється, призводить до зміни відстані між двома призмами, котрі контактують з конструкцією, і ця зміна передається на спеціальний обліковий пристрій важільним, важільно-гвинтовим або гвинтово-зубчастим механізмом. Робота пневматичних тензометрів базується на вимірюванні тиску стисненого повітря в соплі, що примикається до поверхні досліджуваної конструкції. Зміна відстані від поверхні до торця сопла викликає зміну тиску, що реєструється [41].

Для вимірювання деформацій у багатьох точках досліджуваної конструкції і забезпечення засобами обробки даних, реєстрації, вироблення керуючих сигналів або передачі сигналів в системи управління використовують багатоканальну апаратуру [30-35].

Метод тензодобавок. Всі способи і пристрої, опис яких наведено в даному огляді, дозволяють отримати задовільну інформацію про напруження лише тоді, коли відбувається контроль однотипних об'єктів, що виготовлені за однією типовою технологією. Лише у такому випадку параметри залежності вихідного сигналу давача від напружень даної групи виробів можна вважати ідентичними, що дає можливість застосування градуйованого графіку, попередньо отриманого на серії зразків [30-35]. Існуючі прийоми підвищення точності вимірювання даних методів (введення різного роду корекції) не дозволяють вилучити основну похибку даного методу. В основі даного методу лежить неконтрольованість властивостей. Помилка з'являється через існування анізотропії початкових (при відсутності напружень) магнітних властивостей поверхні. Дана анізотропія з'являється при виготовленні

виробу і вносить неконтрольовану похибку (часто суттєву) у результати вимірювань [31 - 34].

Пристрій для реалізації даного методу містить датчик магнітної анізотропії з вимірювачем рівня анізотропії, приставний тензодатчик з тензомостом, пристрій для створення додаткових напружень. Основні вузли пристрою виконано у вигляді приладу. Випробовування приладу на зразках із сталі 3 дозволили оцінити абсолютну похибку методу, яка склала ± 30 МПа в діапазоні вимірюваних значень ± 200 МПа. В якості вимірюваного параметру частіше всього вибирають магнітні властивості матеріалу контрольованого об'єкту чи виробу. Даний метод дозволяє зменшити похибку вимірювання напружень, що викликана коливаннями хімічного складу або структури матеріалу виробу. В лабораторних умовах реально отримана похибка вимірювання напружень складає не більше ± 20 МПа. До переваг даного методу слід віднести також можливість визначення зон пластичної деформації з більшою точністю, ніж за допомогою інших методів [33-37].

Недоліком методу тензодобавок є необхідність створення в контрольованому об'єкті приросту напружень відомої величини. Це значно ускладнює вимірювальну апаратуру та процедуру вимірювань.

Складність при розробці непрямих методів вимірювання абсолютних значень напружень заключається в тому, що невідомими є вихідний стан металу, його механічна передісторія, хімічний склад, кристалографічна структура тощо [37-40].

Задача діагностики напружень на порядок ускладнюється, якщо необхідно контролювати складно-напружений або граничний стан [41-45].

Відомі на сьогоднішній день системи контролю загальної міцності складних технічних конструкцій базуються на однакових принципах і відрізняються лише виглядом і числом застосованих датчиків. Технічна складна конструкція обов'язково обладнується декількома датчиками

механічних напружень (деформацій). Датчики, що використовуються у таких системах контролю та вимірювання, побудовані на різного роду фізичних принципах. Це можуть бути тензорезисторні перетворювачі, волоконно-оптичні тензометри, магнітнопружні перетворювачі, побудовані на явищі магнітопружного ефекту та інші [34, 36-40].

Принцип дії тензорезисторних перетворювачів, заснованих на явищі тензоефекту, полягає у зміні активного опору провідникових або напівпровідникових матеріалів при їхній механічній деформації [34]. Так, наприклад, для вимірювання механічних деформацій при поздовжньому згині інженерних конструкцій широке застосування мають провідникові тензорезистори з застосуванням електричних датчиків механічних напружень довгої та короткої бази.

Датчик механічного напруження з довгою базою (LBSG - long base strain gauge) може бути довжиною 1,50 ... 2,40 м (рис.1.6)., датчик механічного напруження з короткою базою (SBSG - short base strain gauge) – довжиною 0,03...0,13 м (рис.1.7) [34, 36-40].

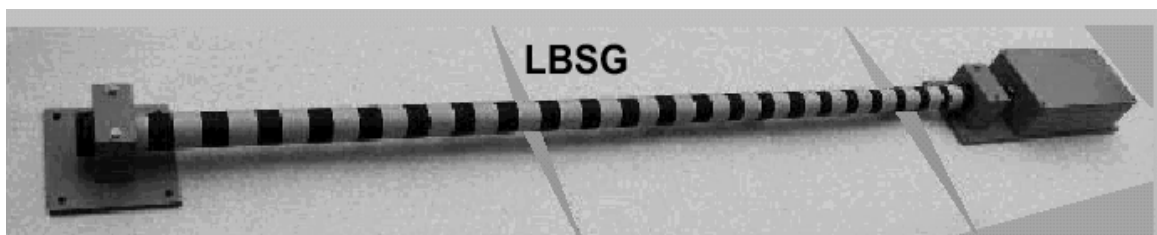


Рис. 1.6. Датчик механічного напруження з довгою базою LBSG

Технічні характеристики датчиків механічного напруження з довгою та короткими базами наведено в табл.1.1 [34].

Таблиця 1.1

Характеристики датчиків механічного напруження

Тип датчика Характеристика	SBSG	LBSG
Точність вимірювання, $\mu\epsilon$	5	5
Діапазон частот, Hz	0 ... 150	0 ... 5
Діапазон лінійності, $\mu\epsilon$	+/- 1000	+/- 2000
Максимальний розмір, м	0,130	2,420
Живлення, V	12 ... 24	12 ... 24
Температурний діапазон, $^{\circ}\text{C}$	-25...+70	-25...+70



Рис. 1.7. Датчик механічного напруження з короткою базою SBSG

Одним з найбільш поширених волоконно – оптичних тензометрів є датчики, що будуються на так званій «решітці Брега (FBG – fiber Brag grating)». Дана решітка є оптичним елементом, який базується на періодичній зміні показника заломлення оболонки оптичного волокна або серцевини [34].

Смуга FBG має можливість відображати назад дещо більшу частину випромінювання. Відображені промені складаються у фазі за умови, коли довжина хвилі в два рази більша, чим період решітки. Внаслідок цього з'являється відображений світловий сигнал, що має досить вузьку

спектральну смугу, а відображена решітками довжина хвилі є брегівською. FBG залишається, практично, прозорою для всіх інших довжин хвиль [34].

Брегівську довжину хвилі можна визначити як відстань між точками експонування та і показником заломлення матеріалу серцевини світловода. Така довжина хвилі, як правило, залежить від двох основних факторів: натяг волокна і температури. Наприклад, в результаті нагрівання для зміни величини натягу волокна показник заломлення і відстань між «точками» брегівської решітки будуть мати інші значення [34].

Таким чином, здійснюючи експериментальні заміри, можна встановити відповідність між довжиною хвилі і натягом волокна і на основі встановленої залежності розробити пристрій, за допомогою якого можна було б визначати за величиною довжини хвилі величину натягу волокна в зоні розміщення брегівської решітки. Тобто у волоконно – оптичних датчиках деформацій на основі FBG механічному напруженню, що вимірюється, завжди відповідає певна величина зміщення брегівської довжини хвилі [34].

Вимірювальний перетворювач FBG складається з наступних елементів [34]: лазера – джерела світла, решітки Брега – чутливого елемента, спектрометра – пристрою реєстрації і мікроконтроллера, який служить для перетворення зміщення довжини хвилі, що відображається решіткою Брега в зручний для використання електричний сигнал. Велика кількість решіток може наноситися на одне волокно. Причому кожна решітка «відкликається» на власній довжині хвилі. В результаті отримуємо розподілену систему реєстрації [34].

Як правило, для контролю стану об'єктів використовують зразу декілька датчиків, що об'єднані в одну систему. Схему системи таких датчиків наведено на рис.1.8 [34].

Широкосмуговий сигнал від напівпровідникового джерела світла 3 через волоконно-оптичний розгалужувач 2 надходить в волоконну вимірювальну лінію 1. Відбитий решітками сигнал через той же

розгалужувач надходить на оптичний аналізатор спектру 4. Персональний комп'ютер 5 через необхідні проміжки часу зчитує спектр і обробляє його за допомогою спеціальної програми. Слід зазначити масштабованість системи як за кількістю датчиків на одній вимірювальній лінії (до 50-100 точок вимірювання), так і за кількістю волоконно-оптичних ліній вимірювання (з використанням оптичного перемикача) [34].

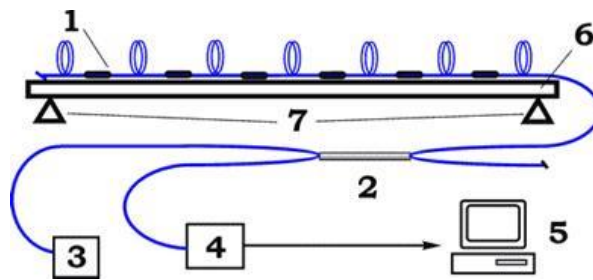


Рис. 1.8. Система волоконно – оптичних датчиків

Локальність вимірювань може становити від декількох міліметрів до декількох сантиметрів в залежності від конкретних умов і завдань [34].

Наявний практичний досвід довів, що прогресивне вдосконалення сенсорних методик, безсумнівно, прискорив еволюцію технології моніторингу. У порівнянні з традиційними механічними та електричними датчиками, датчики оптичних волокон володіють деякими унікальними перевагами, такими як невеликий розмір, невелика вага, несприйнятливість до електромагнітних завад (ЕМЗ), корозії та можливості вбудови. Отже, серед передових методів зондування, розроблених у галузі моніторингу НДС, технологія зондування на основі оптичних волокон здобуває дедалі більшу увагу дослідників та інженерів [34]. Об'єктами моніторингу можуть бути характеристики, близькі з оптичними, зокрема: зміна інтенсивності світла, інтерферометрія, решітка Бреггового волокна (FBG), поглинання, рефлектометрія часової області, рефлектометрія частотної області тощо. Прилади з використанням різноманітних оптико-волоконних датчиків

широко застосовуються в оцінці складних технічних конструкцій, таких як мостів, гребель, аеро-космічної техніки та ін. [20, 34]. За допомогою технології зондування FBG все більша кількість фахівців звертає увагу на структурну оцінку безпеки складних технічних конструкцій, що перебувають у процесі тривалої експлуатації [21, 26, 34].

На даний час розробляються та експлуатуються, в основному, рентгенівський, акустичний, магнітний та тензометричний методи вимірювання напружень. Найбільш широкого застосування набув саме тензометричний метод [46 - 50].

Перші конструкції провідникових тензометрів опору представляли собою дротову нитку, натягнуту на рамку, яка кріпилася на досліджуваному об'єкті за допомогою ножових фіксаторів і кріпильних пристосувань. Ці датчики витримували багаторазове використання, однак були великими і громіздкими, мали обмежені динамічні характеристики і викликали труднощі при монтажі [49 - 54].

У 1937 році американці Е. Сіммонс і А. Рюджі майже одночасно і незалежно один від одного стали наклеювати тонкі дротики на поверхню досліджуваних матеріалів і при цьому встановили, що дріт точно повторює деформації зразків, а його опір змінюється пропорційно зміні деформацій на розтяг та стиск. Так було покладено початок виготовленню дротових тензодатчиків опору [55 - 57].

Дротовий тензорезистор масового застосування (рис.1.9) являє собою плоску петлеподібну дротяну обмотку 2 прямокутної форми (решітку), до кінців 4 якої припаяні виходи з мідного дроту 5. Дротова решітка за допомогою спеціального клею 3 закріплюється на тонкій прямокутній смужці 1 з паперу, клейової або лакової плівки, що служить для решітки підкладкою (основою).

Щоб деформації наклеєної дротової решітки в точності повторювали деформації поверхні конструкції, дріт повинен бути дуже тонким [35 - 40].

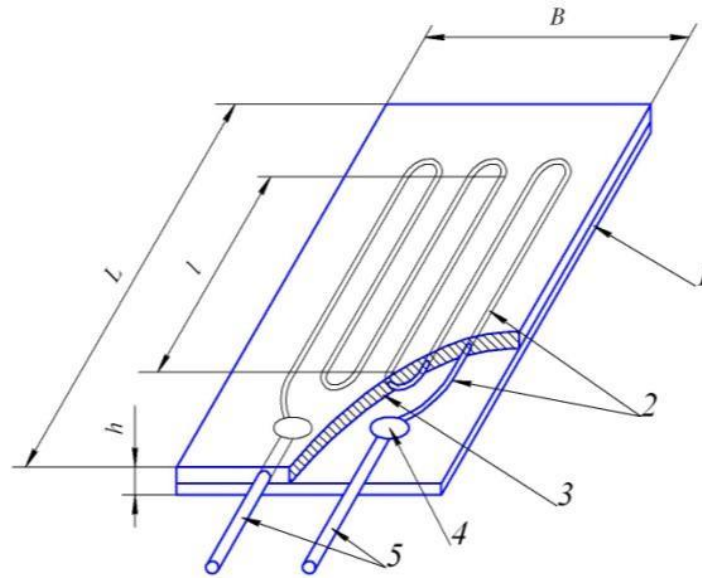


Рис. 1.9. Конструкція дротового тензорезистора

Найвигіднішим вважається діаметр дроту діаметром (0,02 ... 0,025) мм, коли вказане відношення становить (160 ... 200). Зазвичай, застосовують дріт діаметром (0,02 ... 0,05) мм. При такій товщині дроту деформації, що призводять до руйнування (розтріскування) клейового шару, набагато перевершують вимірювані деформації і тензорезистор працює нормально навіть при деформації, що перевищує межу текучості металу [38 - 43].

Чутливість дротової решітки практично однакова як при розтягуванні, так і при стисканні. Пояснюється це тим, що тонкі провідникові нитки по всій своїй довжині знаходяться в міцному шарі клею і при дії деформації не втрачають стійкість, оскільки складають єдине ціле разом з клейовою плівкою і конструкцією [44 - 47].

На сьогоднішній день широкого застосування набули фольгові тензорезистори (рис. 1.10). Вони виготовляються прогресивним методом фотолітографії з дуже тонкої (близько 0,0036 мм) фольги. Оскільки тонка фольга легко пошкоджується, до початку фотографічного процесу і травлення на неї наносять тонку плівку, яка служить несучою основою як в процесі виробництва, так і після при наклеюванні тензорезистора на деталь чи конструкцію [45 - 50].

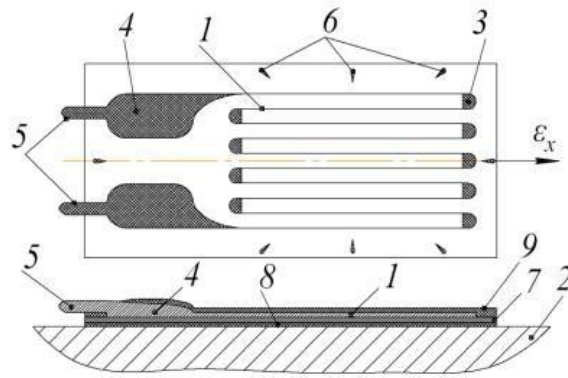


Рис. 1.10. Схема фольгового тензорезистора

Фольгові тензорезистори мають безсумнівні переваги в порівнянні з дротяними і фактично витіснили останні з обігу. По-перше, вони мають прямокутну форму поперечного перерізу ниток чутливої решітки 1 при малій товщині. З одного боку, при цьому збільшується площа зчеплення решітки з поверхнею досліджуваної деталі чи конструкції 2, що робить більш міцним з'єднання тензорезистора з конструкцією, покращує передачу деформації до чутливої решітки, підвищує стабільність і надійність вимірювань [51 - 54].

По-друге, метод фотолітографії дозволяє автоматизувати процес виробництва і отримувати тензорезистори самих різних конфігурацій з широкими поперечними перемичками 3. Наявність широких перемичок робить фольгові тензорезистори практично нечутливими до поперечної деформації деталі, що є їхньою перевагою в порівнянні з дротяними датчиками. Фольгові тензорезистори мають широкі контактні площадки 4 для надійної припайки вивідних провідів 5. Наявність витравлених міток 6 на підкладці 7 дозволяє надійніше контролювати положення тензорезистора на деталі чи конструкції в процесі його улаштування. Між деталлю і підкладкою розташований тонкий клейовий шар 8. Зверху датчик має шар покриття 9 [55 - 57].

В залежності від кількості чутливих решіток, розміщених на одній основі, фольгові тензорезистори поділяються на одноелементні та

багатоелементні. Багатоелементні тензорезистори можуть мати дві, три або чотири решітки [54 - 58].

Найбільш масовими електричними елементами, що використовуються для визначення величини деформації та сили, є резистивні та напівпровідникові тензометричні датчики, а також п'єзоелектричні перетворювачі. Тензометричний датчик вимірює силу непрямим методом – шляхом вимірювання деформації каліброваного елементу, викликаній дією даної сили.

Резистивний тензодатчик являє собою основу із закріпленням на ній резистивним елементом. Через дію сили основа з закріпленням елементом змінює свої розміри: стискається або розтягується і, відповідно, резистивний елемент також змінює свій опір.

1.3. Аналіз дестабілізуючих факторів та фізичних процесів при вимірюванні напруження та деформацій тензометричним методом

Як вже зазначалось, серед методів вимірювання напружень та деформацій переважна більшість дослідників віддає перевагу вимірюванням за допомогою тензодатчиків або тензорезисторів, оскільки вони найкращим чином відповідають критеріям вартість-ефективність, володіючи оптимальним поєднанням даних характеристик [51 - 54].

Тензорезистори широко застосовуються в якості чутливих елементів датчиків, розроблених для вимірювання сил, переміщень, моментів, тиску тощо.

Зміна електричного опору провідника при його розтягуванні або стисненні, назване тензоефектом англійським вченим фізиком В. Томсоном і було відкрито у 1856 році.

Резистивні тензодатчики перетворюють у зміну свого опору деформацію, яка, практично, є рівною деформації об'єкта у місці закріплення датчика. Ці датчики є пасивними і для їхнього збудження (ініціалізації)

використовують джерело живлення, що підключене до вимірювального ланцюга, який містить тензодатчики [54, 55 - 58].

Відомо, що величина електричного опору провідника R визначається співвідношенням:

$$R = \rho \frac{l}{F} , \quad (1.4)$$

де ρ - питомий опір матеріалу провідника; l - його довжина; F - площа поперечного перерізу.

Розглядаючи опір R як функцію трьох змінних, знайдемо його диференціал:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial F} dF = \frac{l}{F} d\rho + \frac{\rho}{F} dl - \rho \frac{l}{F^2} dF , \quad (1.5)$$

Розділивши (1.5) на (1.4), перейдемо до відносного зміни опору:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dF}{F} , \quad (1.6)$$

Отримане співвідношення показує, що відносна зміна опору провідника залежить від суми відносних змін: питомого опору матеріалу, довжини і площі провідника.

Перший член правої частини (1.6) відповідно до досліджень де Фореста [54, 56] дорівнює:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m\varepsilon , \quad (1.7)$$

де m - коефіцієнт пропорційності.

Сучасна фізика пояснює це явище зміною числа електронів, що припадають на одиницю об'єму провідника при пружному деформуванні останнього [54, 56].

Другий член - це відносне подовження провідника [54, 56]:

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon, \quad (1.8)$$

Для провідника круглого поперечного перерізу:

$$\frac{dF}{F} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r}, \quad (1.9)$$

За визначенням коефіцієнт Пуассона є відношенням поперечної деформації до поздовжньої, тобто $\mu = -\frac{dr/r}{\varepsilon}$. Тоді (1.9) можемо записати наступним чином:

$$\frac{dF}{F} = -2\mu\varepsilon, \quad (1.10)$$

Підставивши (1.7), (1.8) і (1.10) в (1.6), отримаємо:

$$\frac{dR}{R} = (m + 1 + 2\mu)\varepsilon, \quad (1.11)$$

Величина $S = \frac{dR/R}{dl/l} = m + 1 + 2\mu$ називається коефіцієнтом тензочутливості металу до деформації.

Коефіцієнт тензочутливості S характеризує інтенсивність зміни відносного опору провідника dR/R в залежності від відносної деформації dl/l .

Перший член в коефіцієнті S визначається зміною питомого опору металу провідника при його деформації, а два інших - зміною його геометрії (dl і dF). При малих пружних деформаціях коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$.

Отже, коефіцієнт тензочутливості зміни геометрії провідника при деформуванні різних металів однаковий і рівний приблизно $1 + 2\mu = 1,6$.

Переходячи до кінцевих величин, отримаємо основне рівняння тензоефекту:

$$\frac{\Delta R}{R} = S\varepsilon , \quad (1.12)$$

Основними дестабілізуючими факторами, які обмежують точність вимірювання з використанням тензодатчика, є [54 - 56]:

- випадкові процеси (шуми, завади тощо);
- часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок старіння та фізичної деградації;
- впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів (температура, вологість тощо).

Що стосується систематичних складових, то найбільш вагомими при статистичних вимірюваннях є похибки нелінійності та температурна складова похибки [54 - 56].

При статичних вимірюваннях основна вимога зводиться до отримання лінійної залежності між вхідною і вихідною величинами перетворювача.

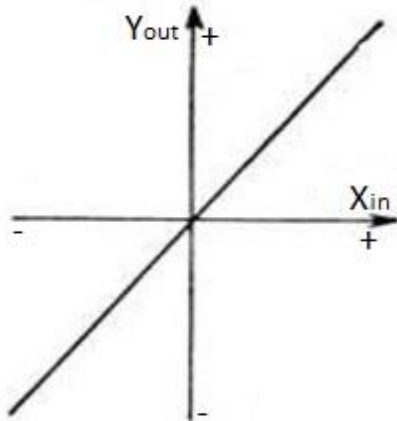
Залежність «вхід – вихід» вимірювальних приладів без врахування таких факторів, як гістерезис, сповзання нуля тощо описується у вигляді рівняння [54]:

$$Y_{out} = (a_0 + a_1 x_{in} + a_2 x_{in}^2 + \dots + a_n x_{in}^n) x_{in} , \quad (1.13)$$

де x_{in} – вхідна величина; Y_{out} – вихідна величина; a_0 , a_1 , a_2 , ..., a_n – градуювальні коефіцієнти.

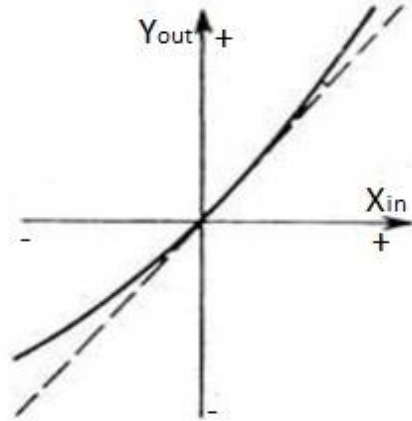
Як видно з рівняння (1.13), в загальному випадку градуювальна крива може бути представлена певною лінією, що примикає до прямої $a_0 x_{in}$. рис.1.11, а) – г) ілюструє дане положення [54].

а)



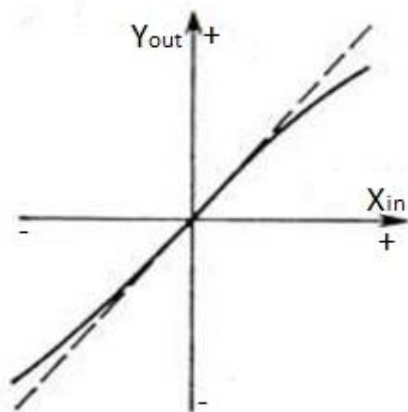
$$Y_{out} = a_0 x_{in}$$

б)



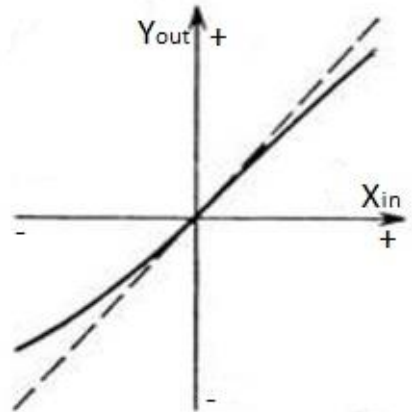
$$Y_{out} = a_0 x_{in} + a_1 x_{in}^2 + a_2 x_{in}^3 + a_3 x_{in}^4 + \dots$$

в)



$$Y_{out} = a_0 x_{in} + a_2 x_{in}^3 + a_4 x_{in}^5 + \dots$$

г)



$$Y_{out} = a_0 x_{in} + a_1 x_{in}^2 + a_2 x_{in}^3 + \dots$$

Рис. 1.11. Типові градуювальні криві:

- а) – лінійна; б) – нелінійна за наявності в рівнянні перетворювальних парних степенів x_{in} ; в) - нелінійна за наявності в рівнянні перетворювальних непарних степенів x_{in} ; г) - нелінійна за наявності в рівнянні перетворювальних парних та непарних степенів x_{in} .

Симетрична крива (рис.1.11, в), що описується рівнянням з непарними степенями $x_{\text{вх}}$, найбільш наближена для приладів з точки зору достатньо хорошої лінійності при значних відхиленнях $x_{\text{вх}}$ від нуля. Практично, наявність симетрії при пружній деформації пружини забезпечує симетрію в градуювальній кривій [54].

На лінійність перетворювачів впливають також нелінійності вихідних характеристик електричних чуттєвих елементів. Для врахування цього ми будемо виходити з того, що вхідний елемент перетворювача не має жодних недоліків, окрім нелінійності, що виражається в загальному вигляді рівнянням (1.13). Але для того, щоб зрозуміти властивості перетворювачів, і, за можливості, керувати ними, слід розглянути деякі відхилення від ідеального «пружного» режиму роботи з врахуванням таких чинників, як [54]: механічний гістерезис, повзучість (в'язка післядія), пружна післядія.

Гістерезис - це різниця значень вихідного сигналу тензорезистора при одних і тих же рівнях вхідного сигналу, отриманих при навантаженні і розвантаженні об'єкта [54, 55-58].

Найбільший гістерезис спостерігається в першому циклі навантаження. У наступних циклах петля гістерезису звужується, стабілізується (рис. 1.12). Якщо дозволяє ситуація, то на практиці роблять попереднє «тренування» датчика, навантажуючи його чотирма - п'ятьма циклами деформації рівнем 125% від максимально допустимого. Таким чином, вдається знизити нелінійність датчика в кілька разів [54].

Концепція гістерезису вміщує ряд явищ, що погіршують роботу вимірювальних приладів, зокрема, наявне тертя в деталях, неналежне затягування гвинтових з'єднань, пил, корозія, тріщинуватість тощо. Ці явища носять випадковий характер, їх не можна математично розрахувати чи описати, тому вони не будить прийматися до розгляду [54].

Механічний гістерезис в елементах перетворювачів, що піддаються впливу деформації, зокрема пружини, мембрани тощо, є наслідком недосконалості мікроструктури матеріалу. Так, при циклічному навантаженні

сталевій пружині збільшення напруження в ній супроводжується збільшенням кількості деформованих і частково зміщених кристалів, які при знятті навантаження не можуть прийняти попередньої форми і повністю повернутися до старої форми [54].

Величина залишкової деформації залежить від значення максимального напруження в матеріалі, але не залежить від часу (частоти). Гістерезисна крива являє собою замкнену петлю, площа якої прямо пропорційна тепловій енергії, яку виділяє деформований об'єкт (рис.1.12) [54].

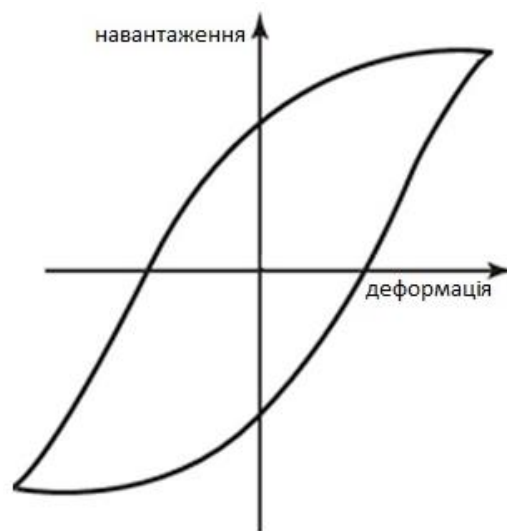


Рис. 1.12. Схема механічного гістерезису

Математичний опис гістерезису є можливим, спроби і намагання отримати відповідні співвідношення для цього явища були, однак всі вони не призводили до достатньо корисних результатів. Для малих циклічних деформацій найбільш зручним математичним представленням гістерезису («внутрішнього тертя») є комплексний модуль Юнга: $E_k = E(1 + j \alpha)$, де E - «еластична» компонента модуля Юнга; $Ej \alpha$ - складова модуля Юнга, що знаходиться в квадратурі з «еластичною» компонентою [54-59].

На відміну від гістерезису, повзучість залежна у часі (рис.1.13). Для будь-якого матеріалу в'язка післядія збільшується зі зростанням

навантаження і температури. Математичне вираження явища в'язкої післядії встановлене в [54, 57] і підпорядковується логарифмічному закону [54].



Рис. 1.13. Схема процесу повзучості матеріалу (в'язкого тертя)

Пружна післядія спостерігається у пружних системах, до яких прикладене певне постійне зусилля. Тоді система матиме невелике додаткове переміщення (рис.1.14), подібне до повзучості, що збільшується у часі, але, на відміну від в'язкої післядії, після зняття навантаження дана залишкова деформація практично зникає [54].

Механізм пружної післядії в механіці вивчений мало, це явище в інформаційних джерелах практично виключене [54, 55-58, 60-68].

Вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика в багатьох практичних задачах є не менш важливим за вплив навантаженням і є важливим фактором, що здатний змінити опір тензорезистора. При зміні температури навколишнього середовища виникає чотири ефекта, що здатні змінити функціональні характеристики датчика [54]:

1. Зміна тензочутливості металевого сплаву S_A ;
2. Подовження або скорочення решітки датчика ($\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$);

3. Подовження або скорочення зразка ($\frac{\Delta L}{L} = \beta \Delta T$);
4. Зміна опору датчика ($\frac{\Delta R}{R} = \gamma \Delta T$).

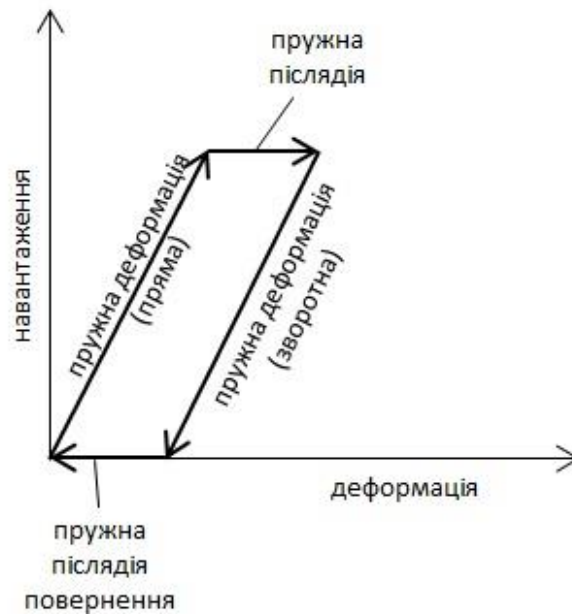


Рис. 1.14. Схема процесу пружної післядії матеріалу

Тензочутливість S_A двох найбільш широко вживаних сплавів (константан та карма) є лінійною функцією температури [54, 55], де для константана $\Delta S_A / \Delta T$ складає 0,00735 %, а для карми - 0,00975% на 1°C . У зв'язку з тим, що зміни S_A досить малі (менше 1% для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$), то при звичайному аналізі напружень вони не враховуються. Однак при дослідженні температурних напружень, коли систематично спостерігаються перепади температури $\sim 10^2^\circ\text{C}$, необхідно враховувати зміни S_A . При цьому найбільш суттєвими є другий, третій та четвертий ефекти, що викликають зміну опору датчика з температурою $(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T}$ відповідно до залежності [54]:

$$(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T} = (\beta - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T, \quad (1.14)$$

де α - коефіцієнт теплового розширення матеріалу датчика; β - коефіцієнт теплового розширення матеріалу зразка; $S_g \Delta$ - тензочутливість датчика; γ - температурний коефіцієнт опору матеріалу датчика.

Відмінність в тепловому розширенні матеріалів датчика і зразка призводить до механічних деформацій решітки датчика $\varepsilon_T = (\beta - \alpha)\Delta T$, що викликані впливом на зразок не силових факторів, а температурних. Датчик реагує на деформацію ε_T так само, як і на деформацію зразка ε , зумовленої навантаженням, що породжує компоненту вихідного сигналу, що відповідає температурі [54].

При рівності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів датчика і зразка, наявна деформація визначається другим членом рівняння (1.14), оскільки перший член дорівнюватиме нулю. Температурна компенсація датчика досягається лише за умови, коли обидва члени рівняння (1.14) або рівні нулю, або взаємно знищуються [54].

Величини α і γ є досить чутливими до вмісту сплаву та режиму його холодної обробки в процесі прокатки фольги. Загальноприйнятим етапом виробничого циклу виготовлення тензодатчиків є вибіркове вимірювання температурних характеристик декількох датчиків із кожного рулону фольги, що використовується при виготовленні решіток. Існування варіацій у величинах α і γ від плавлення до плавлення та від рулону до рулону дозволяє підбирати датчики, що виготовлені на базі сплавів константан і карма, які застосовуються до різноманітних конструкційних матеріалів [54, 56-61].

Матеріали для тензорешіток повинні відповідати таким вимогам [54]:

- мати високий питомий опір, що дозволяє виготовляти малобазні тензорезистори з досить великим опором;
- володіти високою і стабільною чутливістю до деформацій;
- зміни опору, викликані деформацією, повинні підпорядковуватися лінійному закону в достатньо широкому діапазоні;

- бути нечутливим до впливу температури, тобто температурний коефіцієнт опору повинен бути близьким до нуля;
- термо-ЕРС в парі з міддю повинна бути якомога менше, що дуже важливо при живленні тензорезисторів постійним струмом;
- температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу проволочки і матеріалу досліджуваної деталі, на яку наклеюється тензорезистор, повинні бути рівними або незначно відрізнятися, в іншому випадку зміни температури будуть викликати уявну деформацію і, отже, створювати похибки при вимірах;
- не мати гістерезису;
- володіти технологічністю, що дозволяє виготовляти фольгу мікронних розмірів;
- мати високе відношення межі пропорційності до модуля пружності;
- сплави, що застосовуються для виготовлення високотемпературних тензорезисторів, повинні добре протистояти окислювальному впливу зовнішнього середовища.

До розгляду беремо найбільш поширені сплави, що застосовуються для виготовлення тензорешіток, а саме константан та карма. Розглянемо основні переваги та недоліки даних сплавів [54].

Константан. В даний час більшість тензорезисторів виготовляється з цього сплаву в силу наступних його переваг [54]:

- сталість коефіцієнта тензочутливості в досить широкому діапазоні деформацій (до 8%);
- у відпаленому стані константан може бути використаний при вимірюванні деформацій до 20%; проте в цьому випадку у константана проявляється зміна початкового опору, що свідчить про систематичну зміну опору при кожному циклі навантаження;
- відсутність істотних змін при переході від пружного деформування до пластичного;

- константан володіє високим питомим опором ($\rho = 0,49 \text{ мкОм / м}$);
- константан володіє високою температурною стабільністю;
- можливість створення температурно-компенсованих тензодатчиків шляхом узгодження коефіцієнта температурного розширення датчика з аналогічним параметром матеріалу (в діапазоні від 0 до $100 \cdot 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$).

Зазвичай тензорезистори виготовляються з м'якого відпаленого константана. Основними його недоліками є [54]:

- низький коефіцієнт тензочутливості (близько 2,1);
- значна термо-ЕРС в парі з міддю (близько $47 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$). Правда, останній недолік позначається лише при живленні тензомоста постійним струмом при наявності різниці температур між выводами.

Карма. Сплав карма також широко застосовується, причому в порівнянні з константаном він володіє трьома перевагами [54]:

- він може бути температурно компенсований в більш широкому діапазоні температур;
- нікельхромова основа сплаву карма забезпечує тензодатчикам значніші характеристики втоми;
- сплав проявляє високу тимчасову стабільність і тому кращий при вимірюванні статичних деформацій впродовж тривалих періодів часу - від кількох місяців до кількох років.

Головний недолік сплаву карма – складне паяння вивідних провідників до контактних площадок датчика [54].

Слід зазначити, що датчики із вибіркового плавлення не є повністю компенсованими в широкому діапазоні температур через присутність нелінійних членів рівняння (1.5). Типові датчики із вибіркового плавлення виявляють присутність удаваної деформації, яка змінюється зі зміною температури (рис.1.15) [54, 55].

Удавана деформація, що викликана зміною температури в декілька градусів в межах 24°C , є досить малою (менше $0,5 \text{ мкм/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$). Однак при суттєвих змінах температури удавана деформація стає значною, що вимагає відповідної корекції. З цією метою необхідно здійснити заміри температури поблизу датчика і використати залежність удаваної деформації від температури [54, 55].

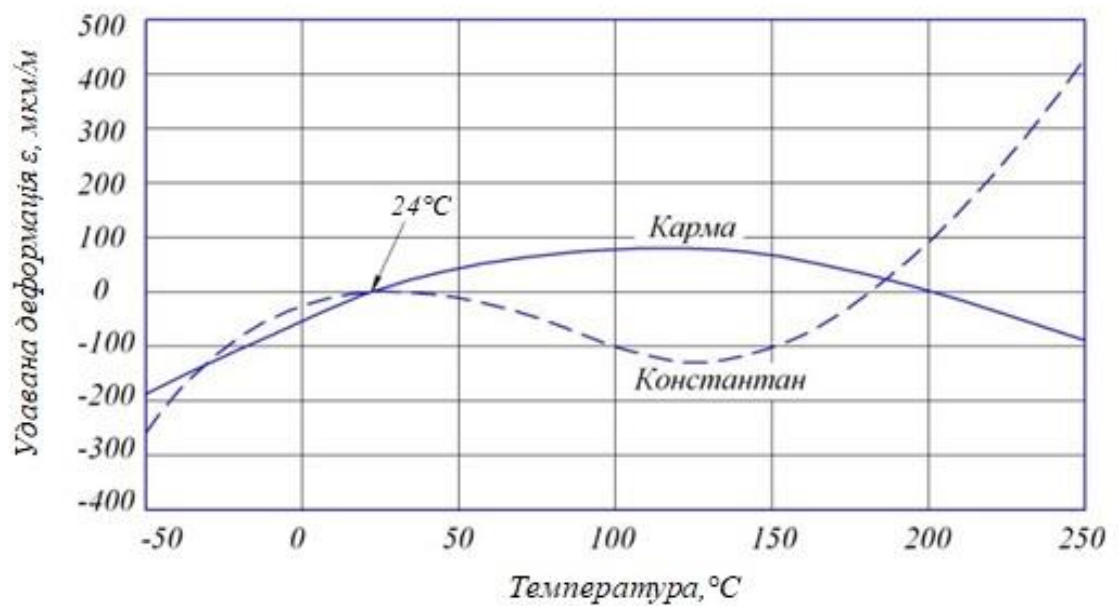


Рис. 1.15. Залежність удаваної деформації від температури для сплавів карми та константану

В табл. 1.2 наведено значення похибки в температурному режимі від -75°C до $+250^{\circ}\text{C}$ для сплавів константана та карми на основі залежності, наведеної в [55].

Таблиця 1.2

Табульоване значення похибки для константану та карми на основі [54, 55]

Температура T , °C	Відносна похибка, о.в.д.	
	Константан	Карма
-75	-500	-260
-50	-266	-190
-25	-89	-120
0	-13,5	-70
+25	0	0
+50	-6	+45
+75	-50	+60
+100	-100	+70
+125	-135	+85
+150	-95	+60
+175	-20	+40
+200	+90	0
+225	+210	-40
+250	+450	-90

1.4. Постановка наукової проблеми

Наведений вище аналіз дозволив встановити, що для вимірювання параметрів напружено–деформованого стану необхідно розробити теоретичні основи і принципи побудови приладової системи для вимірювання напружено–деформованого стану на основі нового інтелектуального інтерфейсу.

Така приладова система повинна бути досить універсальною для того, щоб здійснювати вимірювання напружень та деформацій з розширеними функціональними можливостями та метрологічними характеристиками.

Виходячи з вище викладеного, були сформульовані наступні завдання досліджень:

- дослідити та ідентифікувати параметри математичної моделі вимірювання напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій, проаналізувати сучасний стан розвитку методів і засобів їх вимірювання та провести класифікацію існуючих методів вимірювання напружено–деформованого стану;
- розробити теоретичні основи побудови приладової системи для вимірювання напружено–деформованого стану складних конструкцій, в тому числі принципів побудови вимірювальних систем, методів та математичних моделей цієї системи;
- удосконалити методологію розв’язання проблеми підвищення точності вимірювання параметрів напружено–деформованого стану приладовою системою з покращеними метрологічними характеристиками, а саме підвищенням точності вимірювання, швидкодії та завадозахищеності на основі статистичних даних.
- розвинути теоретичні засади методів та способів дистанційного вимірювання параметрів напружено–деформованого стану та проаналізувати способи підвищення їх метрологічних характеристик на базі розроблених математичних моделей метрологічних характеристик засобів вимірювання та методів оцінювання характеристик точності вимірювань параметрів напружено–деформованого стану;
- удосконалити відомі методики, процедури, схеми метрологічної атестації засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану з урахуванням концепції невизначеності вимірювання;
- проаналізувати систематичні, невилучені систематичні та методичні складові похибок засобів вимірювання параметрів напружено–деформованого стану та проаналізувати складові похибки первинних мікропроцесорних перетворювачів, на основі чого розробити нові більш ефективні математичні моделі та методики для визначення похибок, а також спосіб корекції температурної похибки тензодатчика та інструментальної похибки;

- розробити інтелектуальний інтерфейс для дистанційних вимірювань напружено–деформованого стану за допомогою мультиплексора при дії дестабілізуючих факторів та резистивних тензодатчиків, що забезпечить підвищення точності вимірювань та завадозахищеності, а також розробити математичні моделі попередньої обробки інформаційних сигналів при дистанційних вимірюваннях напружено–деформованого стану;
- провести експериментальні дослідження розроблених засобів вимірювання для підтвердження адекватності розроблених теоретичних моделей, ефективності запропонованих методів та створених на цій основі комп'ютеризованої приладової системи вимірювання напруження та деформації.

Висновки по розділу 1

1. Аналіз факторів впливів на надійність складних технічних конструкцій показав, що із усіх впливів найбільш складними та недослідженими є саме механічні впливи, детальне вивчення яких дозволить нам розробити більш точні методи оцінки залишкового ресурсу, граничного стану, напружено – деформованого стану конструкції.

2. Здійснено аналіз методів вимірювання механічних напружень, розроблено відповідну класифікацію, згідно якої на сьогоднішній день найбільш поширеними методами вимірювання безпосередньо механічних напружень є ультразвуковий, термопружний та магнітопружний методи.

3. Аналіз існуючих засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану показав, що для складних конструкцій в експлуатаційних умовах найбільш широкого вжитку набув метод, в основі якого є застосування дискретних металевих і напівпровідникових тензорезисторів та тензодатчиків.

4. Особливістю випробувань складних технічних конструкцій є

наявність значного числа точок вимірювання (тензометрування), тому для таких цілей використовуються багатоканальні тензостанції та інформаційно-вимірювальні приладові системи.

5. У більшості найбільш поширених методів вимірювання механічних напружень датчиком сприймається абсолютне або відносне значення деформації, оскільки вхідною величиною для перетворювачів, що застосовуються у приладових вимірювальних системах, є переміщення.

6. Основними дестабілізуючими факторами, що обмежують точність вимірювання з використанням тензодатчика, є випадкові процеси (шуми, завади та ін.), часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок старіння та фізичної деградації, а також впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ

В розділі представлено результати теоретичних досліджень, спрямованих на розробку нових методів та засобів вимірювання напружень та деформацій у складних конструкціях в умовах нечіткої вхідної інформації та стохастичної невизначеності з використанням теоретичних положень теорії напружень та деформацій, метрології, теорії вимірювань, теорії надійності, теорії вірогідності та математичної статистики.

Для контролю і забезпечення працездатності складних конструкцій розроблено модель діагностики та визначення напружено-деформованого стану складних конструкцій, змодельовано сценарії виникнення та розвитку небезпечно – напружених станів та відмов у складних технічних конструкціях, за допомогою яких можна прогнозувати небезпечні стани життєвого циклу конструкції та часові межі настання цих станів.

Здійснено комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено – деформованого стану, моделювання граничних і допустимих станів елементів конструкцій з врахуванням випадків вираженого циклічного пружно- пластичного деформування.

Розроблено математичну модель впливу негаусівських завад та розроблено нелінійний метод боротьби з негаусівськими завадами при отримуванні сигналу та обробці інформації засобами вимірювання на основі асимптотично оптимального прийому

Запропоновано модель діагностики та визначення напружено – деформованого стану конструкцій на основі мостової вимірювальної схеми з тензорезисторами з диференціальною схемою підключення. Запропоновано методику розрахунку тензорезисторного датчика деформацій.

За результатами досліджень, що висвітлено у даному розділі, автором опубліковані роботи [1, 10-20, 22-31, 48-50].

2.1 Модель діагностики та визначення напружено–деформованого стану складних конструкцій

На основі вище наведеного аналізу існуючих підходів та методів щодо оцінки напружено–деформованого стану та залишкового ресурсу технічних конструкцій, що склалися в різних галузях промисловості, можна виділити наступні загальні тенденції [25-31, 50]:

1. Багато фахівців при визначенні надійності об'єктів переходять від імовірнісних методів оцінки напружено – деформованого стану та ресурсу, заснованих на статистиці відмов, до оцінки індивідуального ресурсу старіючих технічних об'єктів на основі комплексного підходу, що поєднує результати руйнівного і неруйнівного контролю з перевірочними розрахунками на міцність [10-20, 50].
2. При оцінці напружено – деформованого стану та ресурсу в цілому намітилася тенденція до переходу від дефектоскопії до методів технічної діагностики, що засновані на поєднанні механіки руйнувань, матеріалознавства і неруйнівного контролю, тобто до методів неруйнівного контролю напружено- деформованого стану обладнання і конструкцій [22-31, 50].
3. Усвідомлено необхідність в обов'язковому обстеженні старіючого обладнання та конструкцій для визначення потенційно небезпечних ділянок та зон [48-50].

Разом з тим, слід зазначити недоліки і недоробки, що мають місце при реалізації таких підходів. Так, при комплексному застосуванні різних методів і засобів неруйнівного і руйнівного контролю строго встановленого порядку їх застосування для конкретного об'єкта контролю не існує. Послідовність, порядок, обсяг і періодичність контролю обладнання, як відомо, визначаються, з одного боку, розрахунковим ресурсом, міжремонтним періодом, а з іншого - наявністю засобів і методів контролю з врахуванням експлуатаційних можливостей [1, 50].

Для того, щоб складні технічні конструкції відповідали сучасному рівню науково-технічного прогресу, вони мають бути наділені високою надійністю. Основою для цього служить комплекс заходів, що застосовуються на стадіях проектування, виготовлення, монтажу та експлуатації. На рис.2.1 запропоновано блок-схему оцінки напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу [50, 58-63].

За результатами прогнозування на стадії експлуатації можливе збільшення ресурсу і термінів експлуатації елементів технічних систем. Вирішення цього завдання передбачає встановлення якісних і кількісних закономірностей, що визначають ресурс, розробку методів оцінки впливу різних факторів на середній ресурс і витрати ресурсу об'єкта, що експлуатується, у часі [50, 57-60].

Контрольованими параметрами напружено-деформованого стану можуть бути як безпосередньо вимірювані величини пошкоджень (глибина корозії або зношення деталі), так і вихідні параметри обладнання (продуктивність, коефіцієнт корисної дії, ступінь очищення тощо) та інші кількісні показники якості. Контроль зміни цих параметрів у міру наближення їх значень до гранично допустимих дозволяє прогнозувати момент настання відмови [50, 61, 62]. Оцінка надійності в даному випадку здійснюється шляхом проведення періодичних обстежень об'єкта, вимірювання значень визначаючого параметра, статистичної обробки результатів вимірювань і подальшого розрахунку показників надійності [50].

Як було відзначено, основними джерелами розвитку пошкоджень є зони концентрації напружень. Саме в них структурно-механічні властивості матеріалу необхідно досліджувати в першу чергу [50, 64-68].

На стадії експлуатації машин, обладнання та конструкцій з урахуванням зміни стану їхніх конструктивних елементів і накопичення експлуатаційних пошкоджень проводять випробування як окремих вузлів, так і всього об'єкта, визначають залишкову міцність, ресурс і тріщиностійкість. Подовжувати ресурс безпечної експлуатації можна,

застосовуючи усі види запасів - по номінальному напруженню, місцевим напруженням і деформаціям, тріщіностойкості, часу і числу циклів навантажень тощо [50, 64-68].

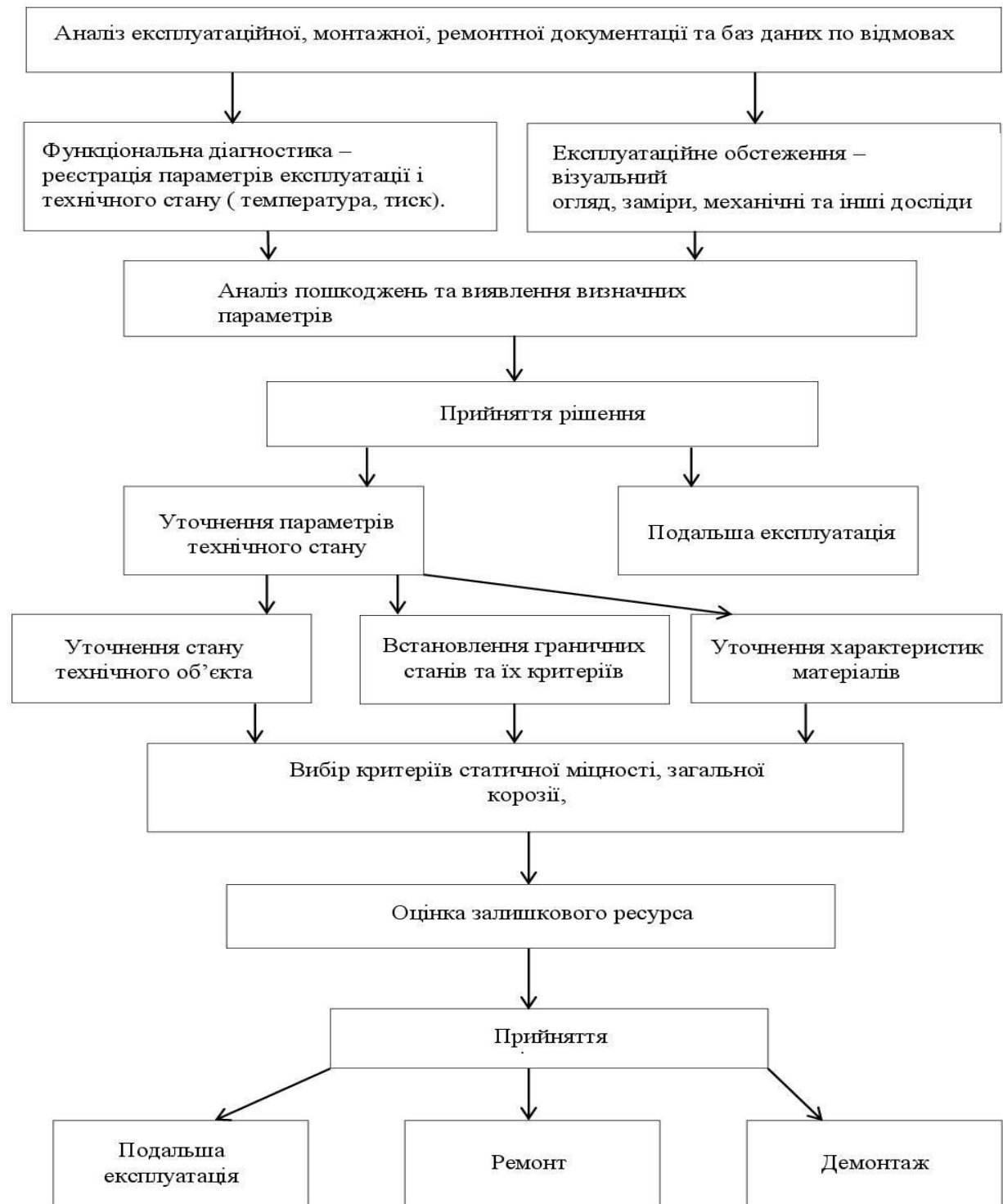


Рис. 2.1 – Блок-схема оцінки залишкового ресурсу конструкції в умовах напружено-деформованого стану

Слід зазначити, що значний вплив на накопичення пошкоджень, а відповідно, і на ресурс мають як конструктивні фактори, включаючи концентратори напружень, так і технологічні, що визначаються механічними властивостями матеріалу. При відсутності макродефектів граничний стан визначається критичними величинами місцевих напружень або деформацій з урахуванням зон концентрації напружень і виділення характерних точок і величин напружень. Введення в розрахунок за критеріями статичної, тривалої і циклічної міцності коефіцієнтів запасу за місцевими напруженнями і деформаціями дозволяє встановити допустиме, з точки зору безпеки, сумарне навантаження за часом, числом циклів навантаження, температурою та оцінити ресурс безпечної експлуатації, в тому числі і при аварійних режимах [50, 68-73].

2.1.1. Сценарії виникнення та розвитку небезпечних напружено–деформованих станів та відмов у складних технічних конструкціях

Характерним підходом в діагностиці, контролі та вимірюванні параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій є розробка сценаріїв виникнення і розвитку напружено – деформованого стану та відмов, що характеризують перехід в часі t від штатних (нормальних) стадій функціонування складних технічних конструкцій до відмов та аварій [61, 63].

На основі аналізу останніх досліджень щодо виникнення та розвитку небезпечних станів та відмов [2-4 ,61 , 63], виділяємо три основні групи сценаріїв [50]:

- 1) сценарії монотонних переходів, коли поточні параметри зовнішніх впливів, реакцій і станів конструкцій монотонно змінюються (як правило, в небезпечну сторону) і безперервно нарастають ризики $R(t)$ до критичних значень $R_c(t)$ (рис.2.2, а), крива 1);
- 2) сценарії з різкими переходами (із загостренням), коли параметри

збурюючих впливів або реакцій змінюються стрибкоподібно (майже миттєво) за короткі проміжки часу, викликаючи різке зростання ризиків $R(t)$ до критичних значень $R_c(t)$ (рис.2.2, а), крива 2);

- 3) сценарії з біфуркаційними (м'якими і жорсткими) переходами, коли в ряді нестійких станів конструкцій можливі зміни зі складною траєкторією зміни ризиків від $R(t)$ до $R_c(t)$ (рис.2.2, б), крива 3) [50].

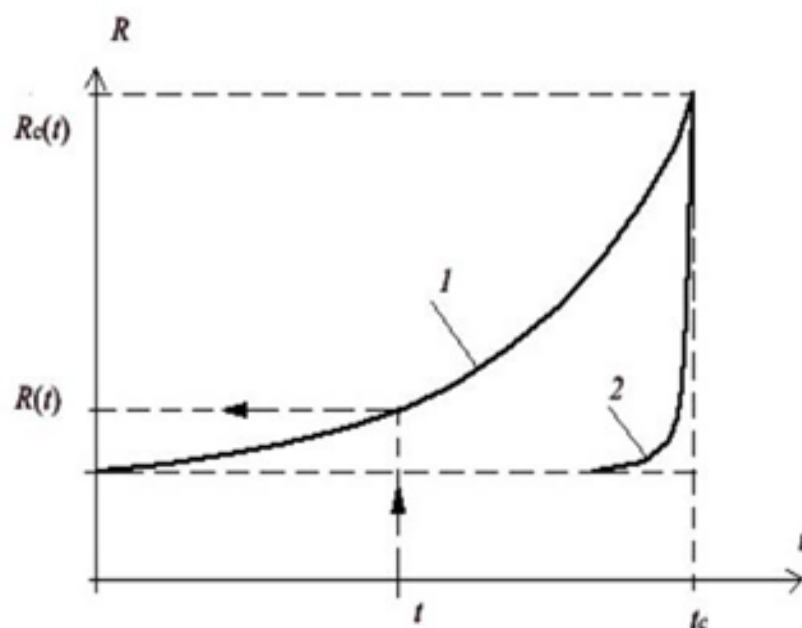
З точки зору забезпечення безпеки й надійності найбільш керованими і простими в управлінні є сценарії з монотонними переходами (рис.2.2, а), крива 1), а найбільш складними - сценарії з біфуркаційними переходами (рис.2.2, б), крива 3) [61, 63].

Наприклад, зростання інженерно-технічної складності конструкції, її енергетична насиченість, розгалуженість інформаційно - керуючих потоків веде до сценарію виникнення та розвитку небезпечних станів та відмов третього типу (рис.2.2, б), крива 3) [61, 63].

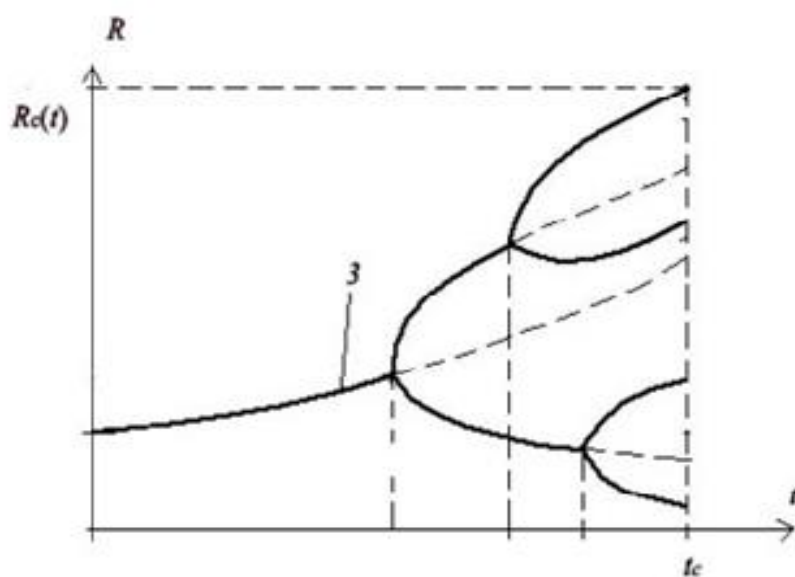
За допомогою аналогічних діаграм можуть бути представлені і діагностичні параметри, і їхня можлива динаміка. Характер зміни діагностичного параметра визначає можливості систем автоматичного захисту запобігти аваріям і можливі наступні техногенні катастрофи на небезпечних виробничих об'єктах [61, 63].

Складна технічна конструкція при відмові окремих елементів і навіть цілих вузлів чи підсистем не завжди втрачає свою працездатність, часто лише знижуються характеристики її ефективності. Це властиво для великих складних технічних конструкцій. Виходячи з вище сказаного, при можливості виникнення аварії за сценарієм «зриву» або біфуркації слід вводити діагностичні параметри, які б оцінювали ті чинники, які проявляються на стадії зародження передумови до переходу на новий режим функціонування або дозволяють оцінити ймовірність такого переходу. Таким чином, попередження небезпечних процесів може бути ефективним лише при можливості або за умови надання своєчасної об'єктивної оцінки складної

технічної конструкції, процесів та прогнозування їхнього майбутнього технічного стану [61, 63].



а)



б)

Рис. 2.2 – Діаграма сценаріїв виникнення та розвитку напружено-деформованих станів та відмов

Для якісного дослідження технічного стану складні конструкції повинні бути розділені на підсистеми (комплекси) і елементи (вузли). У

складі підсистем можуть розглядатися конструктивно та функціонально завершені складові частини системи, взаємодія яких забезпечує досягнення поставленої мети при виконанні запланованої завдання. Як елементи в розгляд включаються складові частини, які є результатом деякого розподілу системи без дотримання принципів конструктивної і функціональної завершеності складових частин. Кожен елемент конструкції пов'язаний з іншими елементами певним чином, а ідентичні елементи можуть мати різні характеристики в різних системах. Тому, перш за все, необхідно виявити взаємозв'язки і провести її структурний аналіз. Отримана таким чином інформація може надаватися у вигляді різних схем, креслень, технічних описів, карт логічних переходів і т.д [61, 63].

Для складних технічних конструкцій характерні складні нелінійні взаємодії між які входять до їх складу елементами, складні ланцюжки (сценарії) причинно-наслідкових зв'язків між небезпечними подіями і процесами, що відбуваються впродовж експлуатації і носять імовірнісний характер.

Аварії, для яких проектом передбачено спеціальні засоби активного управління і захисту, називаються проектними аваріями (ПА), їх перелік і основні параметри (пожежне навантаження, сила вибуху, рівень затоплення при повені тощо) визначаються спеціальними нормами на підставі зіставлення можливих соціальних втрат і матеріальних збитків із необхідними для їх запобігання засобами [61, 63].

Окрім параметрів проектної аварії - ПА, для конкретного об'єкта слід встановити параметри максимально можливої в умовах існування об'єкта природної і (або) техногенної катастрофи (максимально можливої катастрофи - ММК). Методи визначення ММК та її параметрів також встановлюються спеціальними нормами [61, 63].

Дозволяється приймати параметри максимально можливої катастрофи - ММК, виходячи з імовірності їх виникнення у 100 разів меншої ніж прийнята ймовірність виникнення ПА [61, 63]:

$$P(MMK) \leq 0,01 P(ПА), \quad (2.1)$$

де $P(MMK)$ – параметр максимально можливої катастрофи – ММК; $P(ПА)$ – параметр проектної аварії – ПА.

При розробленні спеціальних норм і визначенні параметрів ПА і ММК слід розглядати явища, які можуть бути викликані наступними вихідними подіями [61, 63]:

- катастрофічними перевищеннями інтенсивності природних впливів рівня, встановленого чинними нормами для району будівництва;
- техногенними катастрофами (аваріями транспортних засобів, вибухами, пожежами, витіканням розплавленого металу тощо), які відбуваються в межах об'єкта або в його найближчому оточенні;
- грубими помилками персоналу на стадіях проектування, зведення або експлуатації конструкції;
- серйозним браком або різкою невідповідністю характеристик будівельних матеріалів і виробів, елементів устаткування вимогам нормативно-технічної документації.

При розгляді і класифікації причин ПА і ММК необхідно враховувати також вплив вторинних факторів (вибухів, виникнення пожеж, руйнувань захисних перешкод, ударів від падіння елементів тощо), причиною яких була первісна аварія. Рекомендується розробляти і аналізувати сценарії розвитку аварій [61, 63].

Розрахунок характеристик пошкодження і надійності конструктивних елементів і вузлів складних технічних конструкцій, як правило, заснований на статистичних і детермінованих моделях, які не враховують зміни напружено-деформованого стану і властивостей матеріалу, а також кінетики пошкодженості деталей та елементів систем у часі τ . Більшість процесів

накопичення пошкоджень $d(\tau)$ відбувається упродовж тривалих проміжків часу при багатопараметричних впливах [61, 63].

Введення фактора часу τ в аналіз пошкодження $d(\tau)$ конструкцій можливо на основі кінетичних уявлень про процес накопичення в матеріалі конструкції незворотних пошкоджень механічного, фізичного і хімічного походження з урахуванням сценаріїв багатфакторних статичних, циклічних і динамічних впливів робочих процесів і навколишнього середовища. Основою вирішення даного завдання є розробка методів аналізу, розрахунку та прогнозу граничних станів окремих окремих елементів та конструкції в цілому, а також розробка кваліметрії пошкоджень - методів технічної діагностики, що дозволяють проводити чисельну оцінку ступеня пошкодження деталей, різних за своєю природою і характером [61, 63].

Описані сценарії виникнення та розвитку небезпечних напружено-деформованих станів та відмов передбачають ведення історії експлуатації складних конструкцій, моніторинг діагностичних параметрів, зокрема напружено-деформованого стану, передачу отриманих даних, їх обробку і інтерпретацію [61, 63].

За допомогою аналогічних діаграм можуть бути представлені і діагностичні параметри контролю і вимірювання напружено-деформованого стану, і їхня можлива динаміка. Характер зміни діагностичного параметра визначає можливості систем автоматичного захисту запобігти аваріям і можливим техногенним катастрофам [61, 63].

2.1.2. Аналіз напружено–деформованих і граничних станів складних технічних конструкцій

Науково-методичне обґрунтування нормальної експлуатації складних технічних конструкцій в межах їхнього строку служби, який для більшості інженерних споруд та пристроїв становить 50-100 років, вимагає детального аналізу кінетики характеристик механічних властивостей матеріалу, умов

експлуатаційного навантаження для встановлених реальних параметрів міцності, ресурсу та живучості конструкцій, що характеризують перехід цих складних конструкцій до граничного стану, що служить загрозою як безпосередньо самому об'єкту, так і навколишньому середовищу, персоналу, оточенню [49, 61].

Кількісне обґрунтування можливих умов виникнення аварійних ситуацій повинно бути виконане не тільки для нормальних умов експлуатації, але й для екстремальних умов з обмежено допустимим числом циклів навантаження [49, 61, 77].

Задачі забезпечення надійності конструктивних елементів складних конструкцій традиційно вирішувались в рамках детермінованих підходів. В останні десятиріччя здійснюється перехід до вирішення задачі забезпечення надійності конструктивних елементів у ймовірнісній постановці [49, 61, 66-68], що передбачає оцінку розрахункової ймовірності відмови (аварії) конструктивного елемента. При цьому важливо провести зіставлення критеріїв надійності, що використовуються в рамках детермінованого та ймовірнісного підходів [49, 61].

В число базових проблем обґрунтування розрахункових характеристик у ймовірнісній постановці в рамках теоретичної та експериментальної механіки, механіки деформування і руйнування входять наступні [61, 69, 80]:

- розрахунково – експериментальний аналіз напружено – деформованих станів (σ, ϵ) з врахуванням механічних P^e , термічних Q_t^e , аерогідродинамічних Q_{ah}^e навантажень; при цьому навантаження σ_{\max}^e і деформації ϵ_{\max}^e є залежними від експлуатаційного числа циклів навантаження N^e , часу τ^e і температури t^e [61, 69, 80]:

$$\{\sigma_{\max}^e, \epsilon_{\max}^e\} = F_e\{P^e, Q_t^e, Q_{ah}^e, Q_{rc}^e, N^e, \tau^e, t^e\}, \quad (2.2)$$

- аналіз закономірностей статичного, динамічного, циклічного та тривалого пружного деформування для варійованих в випробуваннях частот f_τ , амплітуд напружень σ_a^e і деформацій e_a^e , температур t^e і часу τ^e [61, 69]:

$$\{\sigma_{max}^e, e_{max}^e\} = F_{1e}\{f_\tau, (\sigma_a^e, e_a^e), t^e, \tau^e\}, \quad (2.3)$$

- аналіз критеріїв і умов накопичення пошкоджень d^e , а також циклічної довговічності N_c^e , у випробуваннях для стадій освіти і розвитку тріщин [61, 69]:

$$\{d^e, N_c^e\} = F_{2e}\{f_\tau, (\sigma_a^e, e_a^e), t^e, \tau^e\}, \quad (2.4)$$

- результати експериментальних і розрахункових досліджень на зразках, моделях і натурних конструкціях дають можливість визначити запаси по напруженням n_σ , деформаціям n_e , числу циклів n_N , часу n_τ , впливу зовнішнього середовища n_Φ і розміру тріщин n_l [61, 69, 80]:

$$\{n_\sigma, n_e, n_N, n_\tau, n_\Phi, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}^e}, \frac{e_c}{e_{max}^e}, \frac{N_c}{N^e}, \frac{\tau_c}{\tau^e}, \frac{\Phi_c l_c}{\Phi^e l^e} \right\}, \quad (2.5)$$

де індекс «с» відноситься до критичної (граничної) величини відповідної характеристики міцності, довговічності, тріщиностійкості, а індекс «е» - до відповідних величинам при експлуатації.

Основою аналізу характеристик міцності, ресурсу живучості та безпеки елементів складних технічних конструкцій в штатних і аварійних ситуаціях є рівняння і критерії лінійної і нелінійної механіки деформування і руйнування. Вони входять в норми міцності і використовуються як при проектуванні, так при виготовленні і експлуатації конструкцій та обладнання.

У відповідності до співвідношень (2.2) – (2.5) однією з важливих задач при вирішенні проблеми обґрунтування надійності, міцності, ресурсу, живучості та безпеки функціонування складних технічних конструкцій є розрахунково - експериментальне визначення реального напружено – деформованого стану складових елементів конструкцій, починаючи від стадії проектування і закінчуючи стадією експлуатації [61, 71, 72].

На основі загальних рівнянь механіки деформування і руйнування (опору матеріалу, теорій пружності, пластичності, термоциклічної міцності, лінійної та нелінійної механіки руйнування, механіки ризику та безпеки, а також на основі розрахунково – експериментального аналізу у відповідності до вище наведених виразів, можна не тільки відтворювати історію реального експлуатаційного навантаження $P(\tau)$, $\sigma(\tau)$, $e(\tau)$, але і оцінювати ступінь накопичення пошкоджень d , розвитку тріщин l_i , вичерпання ресурсу і рівень показників надійності [61, 71, 72].

Наявність розрахунково-експериментальної інформації про зусилля P , температурах t , напружених σ і деформаціях e , а також критеріальних величин опору деформаціям і руйнуванню відповідних конструкційних матеріалів є основою для побудови граничних кривих [61, 71, 72]:

$$P_c = \{(\sigma_{пр}, e_{пр})_{maxk}, t, \tau, N\}, \quad (2.6)$$

де P_c - критичне (граничне) поєднання механічних P_m , теплових P_t і інших типів зусиль для різних режимів навантаження впродовж часу τ , числу циклів N , температурі t .

Величини P_c , як правило, встановлюються за критеріальним величинам місцевих напружень $(\sigma_{пр})_{max k}$ або деформацій $(e_{пр})_{max k}$. Для цього використовують рівняння [61, 71, 72]:

- кривих ізотермічної втоми (мало- або багатоциклової) для відповідних матеріалів:

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_N \left\{ \frac{N, \sigma_B, \psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (2.7)$$

де σ_B - межа міцності, σ_T - межа текучості, S_K - опір відриву, ψ_K - відносне звуження при статичному розриві, m - показник зміцнення в пружнопластичній області;

– кривих тривалої ізотермічної міцності:

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_\tau \left\{ \frac{\tau, \sigma_B, \psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (2.8)$$

– кривих статичної міцності при варіюванні температур t :

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_t \left\{ \frac{t, \sigma_B, \psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (2.9)$$

Криві, що описуються рівняннями (2.7) і (2.8) для металевих конструкційних матеріалів, як правило, мають монотонний вигляд (рис. 2.3): при збільшенні N і τ граничні значення руйнуючих (критичних) напружень і деформацій зменшуються. Температурні залежності критичних напружень і деформацій (2.9) можуть мати в області низьких температур t немонотонний характер: для радіаційно-охрупчених або холодноламких станів металу в цьому випадку міцність і пластичність можуть знижуватися [61,69,73].

За граничними кривими (2.8) - (2.9) для заданого i -режиму, визначеного величинами $\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_i$, встановлюють граничні (критичні) величини N_{ci} , τ_{ci} , t_{ci} , Φ_{ci} . Якщо для i -режиму задані значення N_i , τ_i , t_i , Φ_i , то з використанням кривих втоми, тріщиностійкості, тривалої міцності і стійкості до зовнішніх впливів можна оцінити величини накопичених пошкоджень [61,69,73]:

$$\{d_i\} = \left\{ \left(\frac{N_i}{N_{ci}} \right), \left(\frac{\tau_i}{\tau_{ci}} \right), \left(\frac{t_i}{t_{ci}} \right), \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_{ci}} \right) \right\}, \quad (2.10)$$

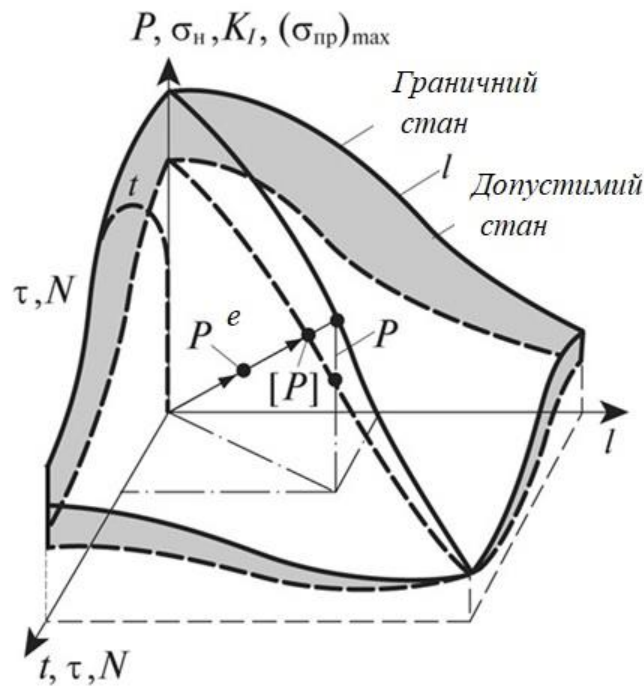


Рис. 2.3. Схема граничних і допустимих станів об'єкта, що вимірюється

Якщо загальне число розглянутих режимів дорівнює k , то сумарне пошкодження на основі гіпотези лінійного підсумовування пошкоджень можна визначати за допомогою виразу (2.10), як суму [61,69,73]:

$$d_{\Sigma} = \sum \{d_i\} \leq 1, \quad \text{де } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

Разом з цим, для випадків вираженого циклічного пружно-пластичного деформування вирази (2.10) і (2.11) можна трансформувати, прийнявши положення, що визначальним фактором пошкоджень d_i є накопичення циклічних пошкоджень N_i / N_{ci} , а фактори t_i , τ_i та Φ_i позначаються на граничній кількості циклів до руйнування. Тоді відповідно до моделей та методів про вимірювання напружено-деформованого стану [61,69,73], маємо:

$$d_{\Sigma} = \sum_i^k \{d_i\} = \sum_i^k \left\{ \frac{N_i}{N_{ci}} (\tau_i, t_i, \Phi_i) \right\} \leq 1, \quad (2.12)$$

Аналіз оцінки міцності і ресурсу в подібних умовах включає в себе створення узагальнених математичних і фізичних моделей складних технологічних, робочих і аварійних процесів в технічних системах для аналізу умов переходу від штатних станів до умов виникнення і розвитку аварій і катастроф. Такі моделі характеризуються багаторівневою структурою, що охоплює глобальні, локальні та об'єктові аспекти безпеки. Ці розробки мають міждисциплінарний характер і лежать в основі нормування безпеки і ризиків [61, 74].

2.1.3. Комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено–деформованого стану складних технічних конструкцій

Спільний розгляд режимів навантаження і місцевих напружено-деформованих станів дозволяє підійти до аналізу динаміки місцевої навантаженості і виявлення амплітуд місцевих напружень $\sigma(\tau)$ та деформацій $e(\tau)$. Особливості тривалого статичного (за часом τ) та циклічного (за числом циклів N) деформування, а також кінетичні процеси, що відбуваються в локальних зонах підвищених місцевих напружень σ_{max} та деформацій E_{max} , як правило, відрізняються від загальних закономірностей циклічної навантаженості об'єктів. Особливу увагу тут слід приділити аналізу сукупності навантажень $F(\tau)$, що здатні призводити до високих місцевих напружень $\sigma_{max}(\tau, N)$ та деформацій $E_{max}(\tau, N)$ [65].

Аналіз особливостей статичних і тривалих статичних і циклічних процесів, а також закономірностей експлуатаційної та місцевої навантаженості дає можливість оцінки механізмів накопичення пошкоджень $d(\tau, N)$ і видів граничних станів за рівнем пошкоджуваності $d_c(\tau, N)$ [65, 68].

Більшість складних інженерних конструкцій та обладнання небезпечних промислових об'єктів працюють при змінних навантаженнях $F(\tau)$ і температурних t впливах. Тому найбільш ймовірними механізмами

накопичення експлуатаційних пошкоджень $d(\tau, N)$ будуть: статична, повторно-статична, малоциклова і багатоциклових втома [65, 67].

Визначення допустимих (розрахункових) значень навантажень $[F(\tau, N)]$, напружень $[\sigma(\tau, N)]$, деформацій $[e(\tau, N)]$, чисел циклів і часу $[\tau]$ навантаження ґрунтується на використанні силових, енергетичних або деформаційних критеріїв руйнування [65].

Вибір критерію граничного стану дозволяє адаптувати розрахунок ресурсу конструкції для різних стадій її пошкодження і руйнування [65].

Впродовж експлуатації, в загальному випадку, на технічні системи в часі τ діють три основних типи навантажень $F(\tau) = F$ [65]:

- механічні F_m (від тиску, маси, сил інерції контактної взаємодії тощо);
- теплові F_t (від нерівномірного розподілу температур t і (або) неоднорідності теплофізичних властивостей матеріалів);
- електромагнітні F_{em} (від впливу електромагнітних полів).

Сумарні експлуатаційні навантаження [65]:

$$F(\tau) = F \quad F(\tau) = F = \{F_m, F_{em}, F_t\}, \quad (2.13)$$

створюють відповідні напруги $\sigma = \sigma(\tau)$ і деформації $e = e(\tau)$ [65]:

$$\{\sigma, e\} = \{(\sigma_m, e_m), (\sigma_{em}, e_{em}), (\sigma_t, e_t)\} = F(F(\tau)), \quad (2.14)$$

При цьому визначальними для наступних розрахунково-експериментальних оцінок міцності, ресурсу, надійності і безпеки приймаються наступні характеристики історії навантаження [65]:

- максимальне розрахункове навантаження F_{max} ;
- максимальна (або мінімальна) розрахункова температура $t_{max} (t_{min})$;
- час заданого режиму навантаження τ_i і загальний час всіх режимів і блоків режимів $\tau \Sigma$ (часовий ресурс).

За даними параметрами встановлюються додаткові розрахункові параметри [65]:

- розмахи зусиль F і амплітуди зусиль $F_a = F/2$;
- розмахи температур t ;
- розмахи зусиль F_B вібраційного (дво- або багато- частотного) навантаження.

З аналізу всіх режимів встановлюються найбільш несприятливі поєднання F і t ; $F_{max} - t_{max}$ для підвищених і високих температур, а також $F_{max} - t_{min}$ для низьких і криогенних температур. Число таких поєднань визначається з урахуванням числа і геометричних форм розраховуються деталей або елементів і числа небезпечних зон і перетинів в них [65].

Комплекс базових параметрів, що визначають граничний стан елементів технічної конструкції, можна представити у вигляді функціональної залежності (2.15), ліва частина якої характеризується сукупністю параметрів (силових, деформаційних і ін.) стану складної інженерної технічної конструкції, що відображають реакцію технічної конструкції на зовнішні (в тому числі аварійні впливи), а права - комплекс аналогічних, але критеріальних характеристик матеріалів (елемента конструкції) [65].

$$\Phi_{N,t,\tau} \{ \{ \sigma, e \}, N, t, \tau \} = \Phi_c, \quad (2.15)$$

Значення $\Phi_{N,t,\tau}$ в критеріальних співвідношеннях встановлюють розрахунком, а критеріальні характеристики матеріалу Φ_c визначають з експерименту на зразках, моделях або натурних елементах конструкцій [65].

З урахуванням сказаного, сумарні динамічні навантаження $F(\tau, N)$ створюють відповідні напружено-деформовані стани $\{ \sigma, e \}$, які, в кінцевому рахунку, і визначають накопичення експлуатаційних пошкоджень $d(\tau, N)$ за часом τ і числу циклів навантаження N при заданій температурі t . Накопичені

пошкодження є функціоналом напружень, деформацій, часу, числа циклів і температур [65].

$$d(\tau, N) = \Phi\{\sigma, e, \{\tau, N\}_t\}, \quad (2.16)$$

Характер навантаження складних технічних конструкцій - послідовність прикладання навантажень з різним рівнем напружень, що виникають в елементах, перевантаження, нестационарний характер навантаження конструкції впливають на напружено-деформований стан « σ - e » і на величину накопичених пошкоджень $d(\tau, N)$ [65].

При цьому потрібно враховувати, що при використанні різних методів отримані оцінки можуть бути консервативними або неконсервативний в залежності від використовуваних законів сумування пошкоджень, які впливають на точність оцінки рівня пошкодження елементів конструкції і, в кінцевому рахунку, на оцінку ймовірності та ризику відмови, аварії або катастрофи (рис. 2.4) [65].

В механіці накопичення пошкоджень під пошкодженістю розуміється скорочення пружного відгуку тіла внаслідок скорочення ефективної площі, що передає внутрішні зусилля від однієї частини елемента конструкції до іншої його частини, обумовленого появою і розвитком розсіяного поля мікродефектів (мікротріщини, дислокації, мікропори, поверхневі мікротріщини, тощо) [65, 72].

Накопичення пошкоджень і руйнування при $dc = d(\tau c, Nc)$ об'єкта, що розглядається в якості складної технічної конструкції, являє собою ієрархічно організований процес, що розвивається по всій ієрархії масштабів, починаючи від наномасштабів, співмірних з міжатомними відстанями, аж до макроскопічного масштабу, що визначається характерним розміром досліджуваного об'єкта. В даний час ключове місце займає багаторівневий аналіз, який об'єднує групу мікро-, мезо- і макромасштабів, що відображають

найбільш значущі структурні елементи, відповідальні за домінуючі механізми реалізації деградаційних процесів в матеріалах [65, 80].

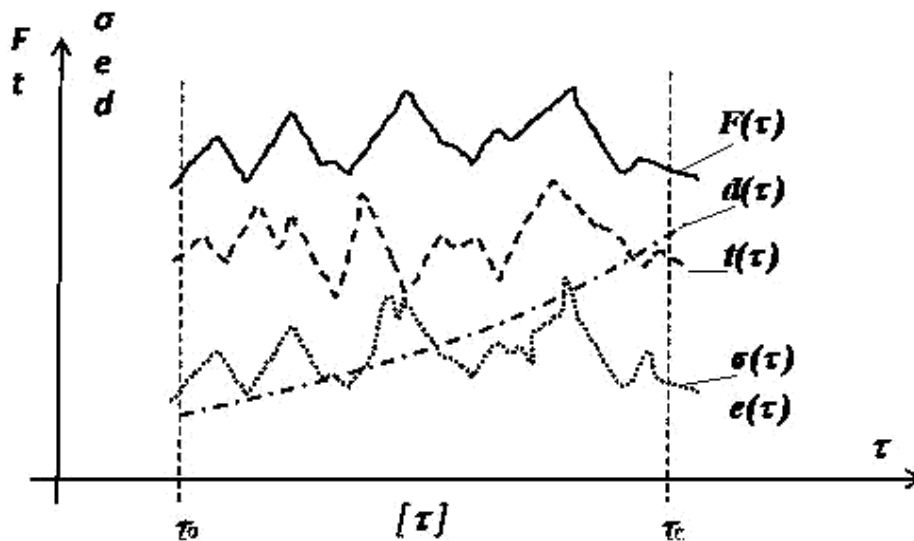


Рис. 2.4 - Часові процеси експлуатаційного навантаження накопичення пошкоджень

На основі моделей і підходів, розроблених в рамках фізичної механіки [80], було виділено чотири масштабних рівня опису процесів накопичення пошкоджень та руйнування [65]:

- 1) системного рівня, що описує можливі послідовності руйнування конструктивних елементів складних технічних конструкцій, що утворюють послідовність руйнування системи в процесі ескалації аварії;
- 2) макрорівня, що описує конструктивні елементи і умови їх спряження з урахуванням макротріщин;
- 3) мезорівня, на якому приймаються до розгляду найбільш значущі структурні елементи;
- 4) мікрорівня, який інтегрально враховує більш дрібні масштаби. Для структурно неоднорідних матеріалів мікрорівень характеризується розмірами мікрообсягу, зокрема для тіл з тріщинами на мікрорівні описується конкретна будова і дефектність атомної решітки в межах мікротріщини [50].

При цьому рівні 2-4 є локальними і в більш простій постановці з урахуванням можливостей сучасних методів технічної діагностики (металографія, дефектоскопія, дефектометрія) можуть бути замінені одним локальним рівнем, що описує процеси накопичення пошкодження і руйнування на рівні окремих елементів, при цьому процеси, що відбуваються на мезо - і мікрорівнях, враховуються через механічні характеристики конструкційних матеріалів [65].

Зважаючи на високу невизначеність щодо інтенсивності режимів експлуатаційного навантаження і структури і механічних властивостей конструкційних матеріалів, а також геометричних параметрів конструктивних елементів даного об'єкту, процес накопичення пошкоджень і руйнування повинен аналізуватися у ймовірнісній постановці [65].

У зв'язку з цим особливу роль набувають методи технічної діагностики, що дозволяють виробляти переоцінку існуючих апіорних оцінок [65].

2.1.4. Аналіз залишкового ресурсу складних технічних конструкцій

Важливою задачею сучасного виробництва є оцінка ресурсу складних потенційно небезпечних інженерних конструкцій на стадії проектування, оцінка відпрацьованого та прогноз залишкового ресурсу в процесі експлуатації, подовження строку служби після відпрацювання нормативного терміну експлуатації. Експлуатаційні умови роботи таких конструкцій характеризуються різного роду впливами, що призводять до деградації конструкційних матеріалів та вичерпування ресурсу конструкцій. Процеси вичерпування ресурсу є багатостадійними, нелінійними та взаємопов'язаними [48, 64].

При оцінці та обґрунтуванні ресурсу складних технічних конструкцій слід вирішувати наступні задачі [48, 64]:

- елементний аналіз конструкції, умов експлуатації, технологію виготовлення та початкову дефектність;
- виявлення домінуючих вузлів, що призводять до вичерпування ресурсу всієї конструкції;
- моделювання вичерпування ресурсу з врахуванням деградації конструкційних матеріалів і умов експлуатації;
- здійснення розрахунків та експериментальних досліджень для виявлення небезпечних зон в конструкціях і визначення конкретних характеристик процесів вичерпування ресурсу в цих зонах;
- формування відповідних баз даних з метою накопичення інформації про процеси вичерпування ресурсу в складних технічних конструкціях і отримання необхідної інформації для оперативної оцінки і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації;
- створення методик і систем оперативної оцінки і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації складних технічних конструкцій;
- отримання необхідної інформації для прийняття рішення про продовження строку експлуатації конструкцій, їх ремонті, реконструкції або заміні.

Основними питаннями для вирішення цих питань з точки зору механіки є [48, 64]:

- вибір макрозмінних, що відображають істотні процеси вичерпування ресурсу на мікро - та макрорівнях;
- обґрунтування строків вичерпування ресурсу з врахуванням міри пошкодження (відмови);
- моделювання процесів деформування та вичерпування ресурсу;
- виявлення основних факторів, що впливають на швидкість процесів вичерпування ресурсу і встановлення конкретних залежностей для цих впливів;
- моделювання залежності швидкостей процесів вичерпування ресурсу конструкції на всіх стадіях його розвитку від умов експлуатації;

- встановлення принципів еквівалентності процесів вичерпування ресурсу між собою та експериментальними даними досліджень;
- встановлення кореляційних залежностей між параметрами математичних моделей вичерпування ресурсу та параметрами діагностики стану конструкційного матеріалу;
- розробка методики та алгоритму оперативної оцінки відпрацьованого ресурсу та прогнозу залишкового ресурсу конструкцій в процесі експлуатації на основі отриманої попередньої інформації;
- визначення реальних експлуатаційних параметрів складних технічних конструкцій впродовж усього часу його експлуатації.

Вирішення поставлених задач вимагає адекватного інформаційного забезпечення за рахунок підвищення надійності функціонування конструкцій, застосування систем внутрішнього контролю і оперативної діагностики стану технічних засобів. Однак всі ці заходи не вирішують у повному обсязі поставлені задачі, особливо в умовах повільної еволюції характеристик об'єкту контролю, їхньої великої розмірності, складнощами в умовах спостереження за протіканням процесів та мінливості факторів, що на них впливають, інформацію про які можна віднести до категорії нечітких множин. Самі моделі процесів носять емпіричний та напівемпіричний характер [48, 64, 75].

В основу моделювання процесів деформування та вичерпування ресурсу рівняння взято рівняння термов'язкопластичності, рівняння розвитку макродефекту, критерії стійкості процесів вичерпування ресурсу та еволюційні рівняння [48, 64, 75-77].

Рівняння термов'язкопластичності містять в собі мікропараметри, що враховують вплив накопичення пошкоджень на фізико – механічні властивості матеріалу конструкції [48, 64, 68, 79].

Критерії, що оцінюють стійкість процесів вичерпування ресурсу, засновані на контролі величини похідної пошкодження (відмови) за

узагальненими енергетичними параметрами, що є внутрішнім часом даних фізичних процесів [48, 64, 80].

Еволюційні рівняння пошкоджень враховують фізичні стадії процесу накопичення пошкоджень, вплив параметрів напружено – деформованого стану, температури, виду траєкторії деформування і вплив деформування на швидкість процесу накопичення пошкоджень, його нелінійний характер, нелінійне сумування пошкоджень при зміні режиму навантаження та від різних механізмів вичерпування ресурсу [48, 64, 80].

Оцінка залишкового ресурсу – багаторівневий ітераційний процес послідовної деталізації і оптимізації діагностичних рішень. Недостатня вивченість окремих явищ не дозволяє мати повністю математично формалізований опис конструкції. Оскільки оцінка здійснюється на основі функції пошкодження (відмови), то для її визначення потрібно враховувати невизначеності, що виникають через мінливість технологічних ситуацій, в яких ставляться діагнози [48, 64, 80].

Існуючі інженерні підходи до оцінки ресурсу при багатоцикловій та малоцикловій втомі базуються на відомих даних навантаження на конструкцію у вигляді певного нестационарного процесу, що задається значеннями еквівалентних напружень або деформацій. За допомогою відомих методик реальний нестационарний процес деформування приводиться до симетричного блочного процесу, причому різні частини одного циклу можуть відноситись до різних навантажень. Використовуються правила лінійного сумування пошкоджень. Ступінь пошкодження оцінюється відносною кількістю циклів (втома) або відносним часом (повзучість). Процеси формування та вичерпування ресурсу моделюються окремо [48, 64].

Для кожної стадії процесу вичерпування ресурсу встановлюється узагальнений енергетичний параметр, що характеризує конкретні умови протікання процесу для кожної небезпечної зони конструкції, що залежить від відповідних долей дисипації енергії на створення мікродефектів в рамках відповідного механізму вичерпування ресурсу. На базі узагальнених

енергетичних параметрів формулюються принципи еквівалентності процесів вичерпування ресурсу між собою в їх еквівалентності експериментальним даним. Реалізується принцип нелінійного сумування пошкоджень. Задачі в рамках механіки пошкоджень формулюються як зв'язані за процесами деформування і накопичення пошкоджень. Складаються еволюційні рівняння накопичення пошкоджень і визначаються критерії стійкості процесів вичерпування ресурсу [48, 64].

В нашому випадку еволюційне рівняння накопичення пошкоджень матиме вигляд [48, 64]:

$$w = \sum_z \frac{\alpha_k + 1}{l_k + 1} f_k(q_k) z_k^{\alpha_p} (1 - w)^{-r_k} \langle z_k \rangle, 0 \leq w \leq w_f < 1, h = e, p, c, \quad (2.17)$$

де w – нормована функція пошкодження (відмови); q_k – параметри напружено – деформованого стану і виду траєкторії деформування; z_k – нормовані долі дисипації на створення мікродефектів по механізмам багатоциклової втоми z_e , малоциклової втоми z_p , повзучості z_c ; α_k , r_k – матеріальні параметри – функції температури; w_f – критичне значення мікротріщини.

Рівняння (2.17) інтегрується разом з рівняннями термов'язкопластичності через параметри q_k , z_k , z_e і температуру T . В свою чергу матеріальні параметри рівнянь термопластичності залежать від накопичених пошкоджень (відмов) [48, 64].

При домінуючих механізмах малоциклової та багатоциклової втоми процес накопичення пошкоджень описується рівнянням [48, 64]:

$$w = 1 - \left\{ 1 - \left[(\alpha_p - 1) \int_0^{z_e} f_p(q_k) z_e^{\alpha_p} \langle dz_e \rangle + (\alpha_e + 1) \int_0^{z_k} f_e(q_k) z_k^{\alpha_e} \langle dz_k \rangle \right]^{\frac{1}{r+1}} \right\}, \quad (2.18)$$

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x \leq 0 \end{cases}$$

або

$$w = 1 - (1 - [y_p^{\alpha_p+1} + y_c^{\alpha_c+1}])^{\frac{1}{r+1}}, \quad (2.19)$$

де y_p та y_e - малоциклова та багатоциклова втоми, як параметри внутрішнього часу процесу:

$$y_p = [(\alpha_p + 1) \int_0^{z_p} f_p(q_k) z_p^{\alpha_p} \langle dz_p \rangle]^{\frac{1}{\alpha_p+1}}, \quad (2.20)$$

$$y_e = [(\alpha_e + 1) \int_0^{z_e} f_e(q_k) z_e^{\alpha_e} \langle dz_e \rangle]^{\frac{1}{\alpha_e+1}},$$

$$z_p = \frac{W_p - W_a}{(W_f - W_a)_p}, \quad z_e = \frac{W_e - W_y}{W_{fe}},$$

де W_p, W_e - долі енергії дисипації, спрямовані на утворення мікродефектів при малоциклової та багатоциклової втоми.

Матеріальні функції W_a, W_y відображають закінчення стадії зародження мікродефектів при мало циклової та багато циклової втоми ($z_k = 0$ при $W_p < W_a$ і $W_e < W_y$), а матеріальні функції W_{fe} - критичного значення відповідних енергій [48, 64].

Згідно рівнянь (2.18) – (2.20) для кожного процесу, що характеризується індивідуальною історією термосилового навантаження на певний об'єм матеріалу, відповідає своя крива накопичення пошкоджень у площині змінних $w \sim W_p$ ($w \sim z_p$), $w \sim W_e$ ($w \sim z_e$), і при зміні режимів термосилового навантаження відбувається перехід з однієї кривої на іншу

(нелінійне сумування). На фазових площинах $w \sim u_p$ та $w \sim u_e$ кожному механізму вичерпування ресурсу відповідають єдині узагальнені криві пошкодження. При цьому швидкості руху по цим кривим залежать від конкретних параметрів навантаження [48, 64].

Для прийняття рішення по залишковому ресурсу необхідно на основі аналізу технічного стану конструкції скласти її модель та задати критерій оцінки експлуатаційного режиму [48, 64, 81].

Запропонований підхід по оцінці виробленого ресурсу у випадку домінування механізмів малоциклової втоми, багатоциклової втоми, повзучості або їхньому поєднанні базується на моделюванні основних фізичних стадій розвитку процесу вичерпування ресурсу, стадій зародження та поширення по всьому об'єму конструкції мікропошкоджень до утворення макроскопічної тріщини, її розвитку та досягнення її критичного розміру [48, 64, 82].

2.1.5. Побудова системи оцінювання ресурсу складних технічних конструкцій

Рішення цього завдання передбачає встановлення якісних і кількісних закономірностей, що визначають ресурс об'єкта, розробку методів оцінки впливу різних факторів на середній ресурс і розкид ресурсу об'єкта, що експлуатується, у часі [62, 71 - 74].

Підконтрольними параметрами можуть бути як безпосередньо вимірювані величини пошкоджень (глибина корозії або зношування деталі), так і вихідні параметри обладнання (продуктивність, коефіцієнт корисної дії, ступінь зношення тощо) та інші кількісні показники якості. Контроль зміни цих параметрів у міру наближення їх значень до гранично допустимих дозволяє прогнозувати момент настання відмови [75, 76]. Оцінка надійності в даному випадку здійснюється шляхом проведення періодичних обстежень,

вимірювання значень визначаючого параметра, статистичної обробки результатів вимірювань і подальшого розрахунку показників надійності [62].

Удосконалення методів розрахунків вимагає, зокрема, обліку стохастичною мінливості властивостей і структури системи, а також мінливості інших випадкових факторів. Необхідним етапом розвитку статистичного підходу повинна стати розробка в рамках існуючих детермінованих схем розрахунку методики оцінювання надійності з урахуванням мінливості властивостей матеріалу і значної невизначеності вихідних даних [62].

Результати чисельного експерименту можуть бути використані для оцінки фізичного стану та безпеки досліджуваного об'єкта або прогнозування залишкового ресурсу. Проблеми обґрунтування безпеки в експлуатації, міцності і ресурсу складних технічних об'єктів на основі чисельного моделювання являє собою дуже розширений клас математичних задач [62].

Одним з основних аспектів вирішення проблем безпечної експлуатації складних технічних об'єктів, що відпрацювали повністю або значну частину проектного терміну експлуатації, є подальше вдосконалення методології оцінки залишкового ресурсу. Однак проблема ускладнюється тим, що формування теорії безпеки промислових об'єктів характеризується переходом від домінуючої раніше концепції "нульового ризику", що базується на нормативних коефіцієнтах надійності і безпеки, до концепції "прийнятного ризику", згідно з якою управління безпекою, по суті справи, є управлінням ризиками [62].

Слід зазначити, що ресурс, розрахований при проектуванні, можна трактувати як поточну величину, яка може уточнюватися в ході експлуатації в міру отримання додаткової інформації про досвід фактичного навантаження на об'єкт [62].

Основне питання полягає в перепризначенні термінів служби на основі аналізу технічного стану об'єкта, додаткових перевірочних розрахунків і оцінки залишкового ресурсу з урахуванням сучасних вимог безпеки. Базою

для призначення нового (продовженого) терміну служби повинні служити докази на стадії експлуатації (тобто з урахуванням уточнених даних) і порівнянні з оцінками, виконаними на основі моделей і характеристик на стадії проектування [62].

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення великого обсягу досліджень, пов'язаних з вивченням умов утворення граничних станів відмов об'єктів за критеріями міцності, ресурсу та надійності на різних стадіях експлуатації. Найбільш ефективним науковим підходом для вивчення нелінійної за своєю суттю поведінки таких об'єктів є математичне моделювання [62].

Математичне моделювання не тільки ефективно доповнює традиційні методи, що застосовуються в розрахунково-експериментальних дослідженнях, а й все частіше виявляється єдиним підходом до прогнозування можливості і наслідків експлуатації складних технічних об'єктів (машин, конструкцій) в екстремальних і аварійних умовах, коли інші методи або непридатні, або не можуть бути використані з економічних, екологічних чи інших міркувань [62].

Основу такого підходу складають математичні моделі процесів, що спостерігаються, ефективні чисельні алгоритми і пакети програм. При цьому фізичне наближення досліджуваних об'єктів, що включає в себе опис (параметризацію) конструктивних форм, поведінки матеріалів і середовищ, а також різноманітних впливів, є ключовим моментом моделювання. Особливо це стосується вибору, обґрунтування і, якщо необхідно, послідовного уточнення моделей поведінки матеріалів і середовищ на підставі даних фізичного лабораторного експерименту і наявних доступних натурних вимірювань [62].

Для успішного проведення обчислювального експеримента потрібна розробка спеціальних баз і банків даних, що включають в себе фізико-механічні властивості деформованих середовищ, характеристик опору деформації і руйнування конструкційних матеріалів, параметрів рівнянь

стану і рівнянь їх еволюції, в тому числі для моделей континуальної механіки пошкоджень, опису типових деталей і вузлів об'єктів з можливими випадками навантаження та ін. [62].

Разом з тим слід зазначити, що самі навантаження, що діють на деформоване тверде тіло, часто заздалегідь невідомі. Вони виникають як результат взаємодії з іншими тілами, оточуючими середовищами або фізичними полями (тепловими, радіаційними, електромагнітними та ін.). Це призводить до необхідності постановки і вирішення завдань, складність яких збільшується за рахунок нелінійного характеру походження [62].

Тоді математична модель системи оцінки фактичного стану технічного об'єкта будується і працює, виходячи з умов і пропозицій [62, 75, 76].

Наявна на даний момент сукупність технічних параметрів об'єкта залежить від того, якими ці параметри були на початку експлуатації, від режиму функціонування об'єкта, умов експлуатації та режимів роботи [62].

Під умовами експлуатації в даному випадку слід розуміти робочі навантаження, систематичні і випадкові фактори корозії тощо, які можна назвати сукупністю руйнівних впливів [62].

Під режимом роботи об'єкта мається на увазі розгортка в часі набору технічних процесів, кожен з яких характеризується сукупністю робочих параметрів [62].

Зміна технічних параметрів описується наступним чином [62]:

$$x(t) = F(x(t_0), u_{[t_0, t]}, K), \quad (2.21)$$

де $x(t)$ — вектор технічних параметрів; $u_{[t_0, t]}$ — умова експлуатації об'єкта в конкретний проміжок часу $[t_0, t]$; K — вектор, що характеризує режим роботи об'єкта.

Про сукупності технічних параметрів об'єкта судять за результатами прямих або непрямих вимірювань фізичних параметрів. Сукупність

результатів вимірювань залежить від відповідних технічних параметрів об'єкта на момент вимірювань і умов, в яких проводилися вимірювання. Дана стадія описується рівнянням [62]:

$$y(t) = G(x(t), u(t)), \quad (2.22)$$

де $y(t)$ – вимірювання при здійсненні контролю (випадкова величина);

$u(t)$ – умова експлуатації об'єкта в поточний момент часу.

За отриманою сукупністю вимірювань будується оцінка істинних значень технічних параметрів об'єкта. Даний процес описується рівнянням оцінок [62]:

$$\hat{x}(t) = H(y(t)), \quad (2.23)$$

де $\hat{x}(t)$ – оцінка вектора технічного стану.

Далі оцінюється фактичний стан об'єкта, про який судять за сукупність оцінок істинних значень технічних параметрів об'єкта, отриманих в конкретних умовах [62]:

$$\Phi(t) = \Psi(\hat{x}(t), u(t)), \quad (2.24)$$

де $\Phi(t)$ – оцінка фактичного стану об'єкта на момент часу t .

Залишковий ресурс об'єкта розраховується за побудованою математичною моделлю і визначається сукупністю оцінок технічних параметрів об'єкта, рівнянням стану, умовами експлуатації, фактичним станом об'єкта і сукупністю граничних технічних параметрів [62]:

$$R(t) = W(t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t)), \quad (2.25)$$

де $R(t)$ – оцінка остаточного ресурсу на момент часу t ; \bar{x} – граничні значення технічних параметрів.

Тоді математична модель системи оцінки фактичного стану остаточного ресурсу матиме вигляд [62]:

$$\begin{cases} x(t) = F(x(t_0), u_{[t_0, t]}, K) \\ y(t) = G(x(t), u(t)) \\ \hat{x}(t) = H(y(t)) \\ \Phi(t) = \Psi(\hat{x}(t), u(t)) \end{cases}, \quad (2.26)$$

$$R(t) = W(t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t), K), \quad (2.27)$$

де (2.21) - рівняння стану (може здаватися еволюційним або диференціальним рівнянням - детермінованим або стохастичним в залежності від вхідних в праву частину величин); (2.22) - рівняння вимірювань (стохастичне); (2.23) - рівняння оцінок (детерміноване); (2.24) - рівняння оцінки фактичного стану об'єкта (передбачає алгоритм віднесення об'єкта до певного класу, побудований на основі імовірнісних методів); (2.27) - рівняння оцінки залишкового ресурсу (передбачає алгоритм прогнозування з використанням рівняння (2.21)) [62].

При цьому за t_0 в рівнянні (2.21) при побудові математичної моделі приймається момент початку експлуатації об'єкта, а при визначенні залишкового ресурсу – момент оцінки технічного стану об'єкта. Для оцінки залишкового ресурсу необхідно в рівняння (2.21) в якості початкових умов вказати оцінку $\hat{x}(t)$ з рівняння (2.23), в якості експлуатаційних навантажень – заплановані навантаження, розрахувати траєкторії зміни технічних параметрів і, відповідно, проміжок часу, впродовж якого ні один із технічних

параметрів не досягне свого граничного значення або вектор фізичного стану не вийде за межі допустимого стану [62].

Дана модель будується для кожного компонента об'єкта. Залишковий ресурс всієї конструкції оцінюється по компоненту в найгіршому стані. Оскільки вимірювання при проведенні контролю є випадковими величинами, то описану модель не можна вважати повністю детермінованою, тому необхідним є математичний опис статистичних закономірностей вимірів і їх зв'язків з показниками стану об'єкта контролю для оцінки фактичного стану цього об'єкта [62].

Необхідно зауважити, що, підбираючи функцію $u(t)$ (умови експлуатації) і вектор K (параметри функціонування) в рівнянні (2.21), можна керувати зміною технічних параметрів, а отже, залишковим ресурсом [62].

При побудові системи оцінки залишкового ресурсу при проектуванні нового (особливо складного) об'єкта в нього необхідно ввести засоби моніторингу поточного стану в найбільш критичних точках (в розрахункових місцях концентрації напружень, відомих вже об'єктів, що знаходяться в експлуатації та ймовірних центрах виникнення корозії тощо) [62].

Описаний підхід до побудови системи визначення фактичного стану і оцінки залишкового ресурсу передбачає ведення історії експлуатації об'єкта, вимір і моніторинг досить більшої кількості діагностичних параметрів, передачу отриманих даних, їх обробку і інтерпретацію [62].

Для визначення фактичного стану і оцінки залишкового ресурсу конструкцій пропонується одночасно оцінювати кілька характеристик матеріалу об'єкта: характерні параметри структури матеріалу, інтегральні параметри матеріалу, пов'язані з міцністю (наприклад, твердість), наявність і характер макродефектів, ступінь корозійного зносу металу [62].

Граничні значення обраних діагностичних параметрів визначаються існуючими стандартами або технічними умовами [62].

Динаміку зміни діагностичних параметрів можна відстежувати і моделювати на основі даних періодичних обстежень об'єкта контролю [62].

2.2. Моделювання впливу негаусівських завад при вимірюванні

У зв'язку із постійно зростаючими вимогами до якісних характеристик приладових вимірювальних систем, спостерігається постійний розвиток методів обробки інформації на основі удосконалення математичного моделювання процесів вимірювання та обробки статистичних даних.

Системи зв'язку, автоматики, телемеханіки тощо функціонують в складній і безперервно змінній завадовій обстановці під впливом сильних імпульсних, синусоїдальних і флуктуаційних перешкод, в основному, з різного виду негаусівською щільністю розподілу імовірностей (ЩРІ) [65, 135 - 139]. Джерелами таких перешкод, переважно, є електронні та силові пристрої, атмосфера (наприклад, атмосферні розряди, грози тощо), системи зв'язку і автоматики.

Одним з основних методів боротьби з негаусівськими завадами є нелінійні методи (нелінійної фільтрації). Теорія нелінійних оптимальних методів фільтрації (виявлення, розпізнавання, оцінка параметрів, фільтрація, ідентифікація) розроблена в кінці ХХ століття на підставі концепції асимптотично оптимального підходу з обрахунком апостеріорної ймовірності (функції правдоподібності) [140 - 144].

Концепція асимптотично оптимальних алгоритмів прийому (обробки) сигналів полягає в тому, що за ходом дискретного спостереження при необмеженому збільшенні вибірки ($(N \rightarrow \infty)$) відшуковується і прямує до нуля амплітуди сигналу $[s(\lambda_i, t) \rightarrow 0]$ асимптотично достатня статистика, розподіл якої підпорядковується гаусівському закону.

Асимптотично оптимальний прийом (АОП) особливо актуальний для систем автоматики, телемеханіки та зв'язку, які працюють при сильних адитивних завадах [140 - 144].

Стохастична модель спостереження в дискретному часі має вигляд [140]:

$$y_h = s_{ih}(\lambda_{ih}, t_h) + n_h, h = 1, 2 \dots q, \quad (2.28)$$

де y_h - реалізації складного коливання $Y(t)$, складовою якого є реалізація дискретного повідомлення λ_i ;

$s_{ih}(\lambda_{ih})$ - вибірки, що являють собою, в загальному випадку, нелінійний оператор перетворення дискретного повідомлення λ_{ih} з ансамбля $\Lambda_i(t)$, який описує методи передачі маніпуляції і кодування сигналу-переносника і вважається повністю відомим;

n_h - вибірка адитивної завади, що відображає випадковий процес з довільною, але відомою (гаусівською або негаусівською) одномірною і симетричною відносно нуля щільністю розподілу ймовірностей;

λ_{ih} - вибірки оцінюваного дискретного повідомлення $\lambda_i(t) = \lambda_i$ зі своїм розподілом імовірностей (PI) ($i = 1, 2, \dots$).

Число вибірок (координат) N на інтервалі спостереження, що дорівнює тривалості переданого елементарного символу T_c становитиме $N = T_c/T_o$, де (T_o – період формування вибірок).

Припустимо, що асимптотично оптимальний приймач (АОП) працює у відповідності з алгоритмом максимальної правдоподібності. При цьому АОП обчислює функцію правдоподібності для всіх «а» можливих значень дискретного повідомлення λ_i , а вирішальний пристрій (ВП) приймає рішення у відповідності до виразу [135 - 140]:

$$\lambda_i = \max_{i=\overline{1,a}} \{Q_{ao}(\lambda_i)\} \quad (2.29)$$

де $Q_{ao}(\lambda_i) = \ln w_{\lambda_i}(y)$ - вихідний сигнал асимптотично оптимального фільтруючого пристрою (АОФП); $w_{\lambda_i}(y)$ - функція правдоподібності (ФП).

Якщо припустити, що вибірки завад $n_h = n(t_h)$ являють собою випадкові величини з похідною ЦРІ і утворюють процес з незалежними значеннями (білий шум), то вираз для функції правдоподібності $w_{\lambda_i}(y)$ можна записати у вигляді добутку одновимірних щільностей розподілу імовірностей [135 - 138] тобто:

$$w_{\lambda_i}(y) = \prod_{h=1}^H w_{\Pi}[y_n - s_n(\lambda_i)], \quad (2.30)$$

де $w_{\Pi}[y_n - s_n(\lambda_i)] = w_{\Pi}$ – щільність розподілу імовірності завади.

Взявши натуральний логарифм функції правдоподібності, розкладемо кожен його доданок в ряд Тейлора і, обмежившись першим лінійним членом, отримаємо вираз для вихідного ефекту, що описує роботу асимптотично оптимального фільтруючого пристрою приймача ДС (обчислюється для всіх «а» значень дискретного повідомлення):

$$Q_{ao}(\lambda_i) = \ln w_{\lambda_i}(y) = \sum_{h=1}^H Z_{ao}(y_h) s_{oh}(\widehat{\lambda_{ih}}), \quad (2.31)$$

де

$$Z_{ao}(y_h) \approx Z_{ao}(n_h) \approx -d \ln w_{\Pi}(y_n) / dy_n \approx -d \ln w_{\Pi}(n_n) / dn_n \quad (2.32)$$

амплітудна характеристика безінерційного нелінійного блоку перетворення (гасіння) негаусівських завад (БНЗ).

У відповідності до алгоритму максимальної правдоподібності вирішальний пристрій (ВП) вибирає з «а» вихідних ефектів сигнал з максимальною амплітудою. Тобто ВП повинен працювати як детектор максимального сигналу (ДМС).

Згідно (2.29) і (2.31) структурна схема асимптотично оптимального приймача (АОП) складається з «а» паралельно включених кореляторів

(лінійних узгоджених з сигналами фільтрів) і ввімкненого перед ними безінерційного нелінійного (для негаусівських завад) гасія завад, амплітудна характеристика якого Z_{ao} однозначно пов'язана з одномірною щільністю завади $w_{\Pi}(n_n)$, а також системи синхронізації, яка формує опорні сигнали $s_{oh}(\widehat{\lambda_{ih}})$ для перемножувачів кореляторів і вирішувального пристрою ВП. БНЗ і корелятори являють собою асимптотично оптимальний приймально-фільтруючий пристрій (АОПФП), що забезпечує максимальне відношення сигнал / завада на своєму виході.

2.2.1. Оцінка завадостійкості асимптотично оптимального приймача

Визначимо значення відношення сигнал / завада на виході АОПФП, яке характеризує правильність вибору вирішувального пристрою ВП каналу з максимальною амплітудою і завадостійкістю АОП (імовірність помилки) в цілому [138 - 141].

Розклавши в ряд Тейлора функцію $Q_{ao}(\lambda_i)$ в межах точки $n(t)$, отримаємо сигнал на виході БНЗ [138 - 141]:

$$Z_{ao}[y(t)] \approx Z_{ao}[n(t) + s(\lambda_i, t)]dZ_{ao}[n(t)]/dn(t) \quad (2.33)$$

Тоді на підставі (2.32) і (2.33) вихідний ефект $Q_{ao}(\lambda_i)$ АОПФП можна записати у вигляді [138 - 141]:

$$Q_{ao}(\lambda_i) = q(\lambda_i) + g(\lambda_i) = \sum_{h=1}^H s_h(\lambda_i)s_{oh}(\lambda_i)dZ(n_h)/d(n_h) + \sum_{h=1}^H s_h(\lambda_i)Z(n_h), \quad (2.34)$$

Як видно з (2.34), $Q_{ao}(\lambda_i)$ включає дві складових: $q(\lambda_i)$ і $g(\lambda_i)$. Перша представляє корисну сигнальну частину $Q_{ao}(\lambda_i)$. Друга складова представляє завадову частину $Q_{ao}(\lambda_i)$.

Відношення квадрата максимуму середнього значення сигнальної функції $M[g(\lambda_i)]$ до дисперсії завадової функції σ_g^2 , будучи еквівалентом відношення сигнал / завада на виході асимптотично оптимального приймально-фільтруючого пристрою, визначається за формулою [138 - 141]:

$$p_{\text{нг вих}} = \frac{M^2(q_{\text{max}})}{\sigma_g^2} = P_c H I_{\text{ФПл}} = E_l I_{\text{ФПл}} \quad (2.35)$$

де M - знак математичного очікування; $E_l = P_c H$ - енергія сигналу; $P_c = \sum_{h=1}^H s_h^2(\lambda_i)/H$ - середня потужність сигналу $s(\lambda_i, t)$;

$$I_{\text{ФПл}} = \int_{-\infty}^{+\infty} [dZ_{ao}(n)/dn]^2 w_{\Pi}(n) dn, \quad (2.36)$$

кількість інформації по Фішеру відносно завади з одномірним розподілом $w_{\Pi}(y)$.

Помноживши і поділивши (2.35) на дисперсію завади $\sigma_{\text{п.вх}}^2$ на вході приймача, перепишемо (2.35) у вигляді рівняння:

$$\begin{aligned} p_{\text{нг вих}} &= P_c H I_{\text{ФПл}} / \sigma_{\text{п.вх}}^2 / \sigma_{\text{п.вх}}^2 = \\ &= p_{\text{г.вих}} \mu_{ao}^2 = \left(\frac{E_l}{\sigma_{\text{п.вх}}^2} \right) \mu_{ao}^2 = \alpha_l^2 \mu_{ao}^2, \end{aligned} \quad (2.37)$$

де $p_{\text{г.вих}} = P_c H / \sigma_{\text{п.вх}}^2 = \alpha_l^2$ - відношення сигнал / завада по енергії на виході АОПФП при впливі білого гауссівського шуму; μ_{ao}^2 - коефіцієнт гасіння негаусівської завади в асимптотично оптимальному БНЗ в порівнянні з оптимальним лінійним приймачем, що визначається розгорнутим рівнянням:

$$\mu_{ao}^2 = \alpha_l^2 I_{\text{ФПл}} = \sigma_{\text{п.вх}}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} [d \ln w_{\Pi}(n)/dn]^2 w_{\Pi}(n) dn, \quad (2.38)$$

При гаусівській заваді БНЗ перетворюється в лінійний підсилювач ($\mu_{ao}^2 = 1$, $I_{\Phi\Pi} = 1/\sigma_{\Pi.BX}^2$), а АОП - в відомий оптимальний кореляційний приймач ДС [138 - 141]. Таким чином, теорія АОП може використовуватися для синтезу оптимальних приймачів при впливі завад з довільним законом розподілу.

Коефіцієнт $\mu_{ao}^2 \geq 1$ при будь-якій негаусівській заваді завжди більше одиниці і дорівнює одиниці лише при гаусівській заваді [142-144]. Це говорить про те, що при негаусівській заваді і асимптотично оптимальному прийомі різних сигналів завадостійкість, що характеризується імовірністю помилки на символ $P_{ош}$, може бути значно меншою, ніж при прийомі на лінійний кореляційний приймач (при рівних енергетичних співвідношеннях на вході приймачів).

У табл. 2.1 в якості прикладів наведено отримані на основі формул (2.33) і (2.38) аналітичні вирази Z_{ao} , μ_{ro}^2 для наступних видів негаусівських законів розподілу завад: узагальненого гаусівського (УГР), аномально зашумленого (АЗР, бігаусівського), бімодального (БМР). Тут же зазначені деякі параметри негаусівських розподілів (ексцес - E_k , коефіцієнт гасіння завад при використанні ідеального обмежувача - $2\mu_{ro}^2$) формулою [138 - 141].

В даному випадку імовірність помилкового прийому дискретних сигналів $P_{ош}$ може розраховуватися за відомими формулами і графіками для лінійного оптимального приймача при гаусівській заваді α_l^2 , якщо в них під відношенням сигнал / завада на виході нелінійного оптимального приймача $p_{нг вих} = \alpha_l^2 \mu_{ao}^2$, розуміти вираз (2.37).

При асимптотично оптимальному прийомі рівновіддалених (еквідистантних) $r_c(s_i, s_j) = const$ повністю відомих сигналів з однаковою енергією $E_i = E_j = E_l = const$ під впливом завад з довільним, але відомим розподілом, імовірність $P_{ош}$ буде визначатися за формулою [138 - 141]:

$$P_{oш} \approx (a - 1)V[\alpha_l \mu_{ao} \sqrt{1 - r_c(s_i, s_j)}], \quad (2.39)$$

де $\alpha_l^2 = E_l / \sigma_{п.вх}^2$; $r_c(s_i, s_j) = (1/E_l) \int_0^{T_c} s_i(t) s_j(t) dt$ - коефіцієнт взаємної кореляції між сигналами s_i, s_j ; $V(\cdot) \leq 0,5$ - додток до інтеграла імовірностей (таблична функція), значення якого дається в [138]. Тут же є розрахункові формули для $P_{oш}$ при інших типах ДС і методах їх прийому.

Таблиця 2.1

Закони розподілу і параметри негаусівських завад, характеристики БНЗ

Аналітичний вираз для розподілу $w_{п}(n)$	Характеристика АО БНЗ $Z_{ao}(n) = -\frac{d}{dn} \ln w_{п}(n)$	Асимптотично оптимальний коефіцієнт гасіння завади μ_{ao}^2	Реальний коефіцієнт гасіння обмежувачем $\mu_{р.о.}^2 = 4\sigma_n^2 w_n^2(0)$	Екссес розподілу $\mathfrak{Z}_K = m_4 / m_2^2$
1. УГР $\frac{v\eta(\sigma_{п}, v)}{2\Gamma(1/v)} \times$ $\times e^{-\eta(\sigma_{п}, v) n ^2}$ $\eta(\sigma_{п}, v) =$ $= \sigma_{п}^{-1} \sqrt{\frac{\Gamma(3/v)}{\Gamma(1/v)}}$	$v[\eta(\sigma_{п}, v)]^v \times$ $\times n ^{v-1} \sin n$	$\frac{v^2 \Gamma(\frac{3}{v}) \Gamma(\frac{2v-1}{v})}{\Gamma^3(\frac{1}{v})}$	$\frac{v^2 \Gamma(\frac{3}{v})}{\Gamma^3(\frac{1}{v})}$	$\frac{\Gamma(5/v) \Gamma(1/v)}{\Gamma^2(3/v)}$
2. БМР $C e^{qn^2 - n^4/2}$ C $= \frac{\exp(-q^2/4)}{\sqrt{\pi} D_{-\frac{1}{2}}(-q)}$	$2\sigma_{п}(-qn + n^3)$	$4\sigma_n^2(q^2\sigma_n^2 - 2qm_4 + m_6)$	$4m_2c^2$	$\frac{3D_{-\frac{5}{2}}(-q)D_{-\frac{1}{2}}(-q)}{D_{-3/2}^2(-q)}$
3. АЗР (бігаусівський) $\frac{(1 - P_{ам})}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} e^{\frac{-n^2}{2\sigma_l^2}}$ $+ \frac{P_{ам}}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{\frac{-n^2}{2\sigma_2^2}}$	$-n[(1 - P_{ам})\sigma_2^2 N(0, \sigma_l^2) +$ $+ P_{ам}\sigma_l^2 N(0, \sigma_2^2)] / \{\sigma_l^2 \sigma_2^2 \times$ $\times [(1 - P_{ам})N(0, \sigma_l^2) +$ $+ P_{ам} N(0, \sigma_2^2)]\}$	$P_{ан}^2 + (1 - P_{ан})^2 +$ $+ P_{ан}(1 - P_{ан}) \times$ $\times (\gamma^2 + \gamma^{-2})]$ $\gamma^2 = \sigma_2^2 / \sigma_l^2$	$2/\pi[(1 - P_{ан})\sigma_l^2 +$ $+ P_{ан}\sigma^2 \times$ $\times \left[\frac{1 - P_{ан}}{\sigma_l} + \frac{P_{ан}}{\sigma_2}\right]^2$	$3 \frac{(1 - P_{ан})\sigma_l^4 + P_{ан}\sigma_2^4}{[(1 - P_{ан})\sigma_l^2 + P_{ан}\sigma_2^2]^2}$

Таблиця 2.2.

Числові значення узагальненого гаусівського розподілу

ν	0,5	0,6	1	2	5	10
\mathfrak{Z}'_K	22,2	12,59	3	0	-0,82	-1,11
μ_{ao}^2	∞	28,4	2	1	1,65	3,18
μ_{po}^2	30	9,57	2	0,63	0,37	0,34

Як видно з (2.39), імовірність помилкового прийому $P_{ош}$ дискретного сигналу суттєво залежить від α_t^2 , μ_{ao}^2 , ансамбля сигналу α , їх коефіцієнта кореляції r_c .

Чим більше щільність розподілу імовірності негаусівської завади відрізняється від ЩРІ гаусівського типу білого шуму, тим більше коефіцієнт гасіння μ_{ao} і менше $P_{ош}$.

2.2.2. Вплив законів розподілу і характеристик завад на якість вимірювання

Слід зазначити, що в теорії і практиці використовується значна кількість моделей ЩРІ для опису негаусівських імпульсних, синусоїдальних і флуктуаційних завад. Деякі з моделей завад (у вигляді ЩРІ $w_{\Pi}(n)$) наведено в табл. 2.1. Інші види ЩРІ містяться в [133, 135 - 139].

Розглянемо, чим (якими параметрами, заходами) відрізняються негаусівські процеси від гаусівських і один від одного, як параметри впливають на гасимі завади і чи можна ідентифікувати закони розподілу. Цим питанням присвячено чимала кількість праць [62, 64, 138, 140]. Коротко зупинимося лише на деяких мірах (показниках) негаусовості, які важливі в контексті теми.

Такими мірами негаусівських законів розподілу випадкових процесів виберемо всього три. Кумулянти (семіінваріанти), починаючи з третього і

вище, і пов'язані з ними моменти і коефіцієнти - наприклад, ексцес розподілу [133, 135 - 139].

Ексцес розподілу E_K служить для характеристики крутизни розподілу і визначається за допомогою формули:

$$E'_K = E_K - 3 = (m_4/m_2^2) - 3 = (m_4/\sigma^4) - 3, \quad (2.40)$$

де m_2, m_4 - другий і четвертий центровані моменти;

σ^4 - четверта ступінь середнього квадратичного відхилення.

Для гаусівських процесів $E_K = 3$. Тому E'_K - ексцес відносно гаусівської ЦПІ. При цьому він дорівнює 0 [133].

Інформаційну міру Фішера і пов'язані з нею характеристики, наприклад, оптимальний коефіцієнт гасіння негаусівських завад, визначаємо за допомогою формули (2.38). Коефіцієнт гасіння завад при використанні БНЗ з характеристикою неузгодженої з ЦПІ завади знаходимо за допомогою рівняння:

$$\mu_p^2 = \sigma_{\Pi, \text{вх}}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} [dZ_p^2(n) w_{\Pi}(n)/dn], \quad (2.41)$$

де $Z_p(n)$ - реальна характеристика БНЗ.

Залежно від ступеня узгодження БНЗ і ЦПІ завади коефіцієнт μ_p^2 може бути більше або менше одиниці, тобто або гасити заваду (але в меншій мірі, ніж при узгодженні), або навіть її посилювати [133].

Виходячи з простоти технічної реалізації при вимірах коефіцієнта μ_p^2 як пристрій для оцінювання може бути обраний ідеальний обмежувач з характеристикою [133]:

$$Z_p(n) = Z_{p.\text{орг}} = (\sqrt{2}/\sigma_{\Pi}) \text{sgn } n$$

де $\operatorname{sgn} n$ - знакова функція:

$$\operatorname{sign} n = \begin{cases} 1 & \text{при } n \geq 0 \\ -1 & \text{при } n \leq 0 \end{cases}$$

Для такого БНЗ коефіцієнт гасіння негаусівської завади із симетричною ЩРІ визначається виразом:

$$\mu_{po}^2 = 4\sigma_{п.вх}^2 w_{\Pi}^2(0), \quad (2.42)$$

де $w_{\Pi}(0)$ - значення ЩРІ завади в нулі; $\sigma_{п.вх}^2$ - дисперсія завади на вході БНЗ.

Приклади розрахунку числових значень введених мір негаусовості μ_{po}^2 за визначеними в табл. 2.1 аналітичними формулами для двох видів ЩРІ наведені в таблицях 2.2 та 2.3.

При роботі в реальних умовах точне узгодження характеристики БНЗ з ЩРІ завади виявляється ускладненим, в більшості випадків, через неповну апріорну інформацію про завади та інших причин.

З наведених у таблицях 2.2 та 2.3 даних видно, що ідеальний обмежувач забезпечує значне гасіння завад при ОГЗ (з параметром $\nu < 1$), АЗР та інших розподілах з позитивним ексцесом.

Таблиця 2.3

Числові значення мір аномально засміченого (бігаусівського) розподілу

$p_{ан}$	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
η^2	10	100	1000	10	100	1000	10	100	1000
E'_K	6,05	22,27	26,46	3,72	6,55	6,95	2	2,88	2,9
μ_{ao}^2	1,72	9,81	90,81	2,62	21,49	210,5	2,83	25,25	250
μ_{po}^2	0,98	5,62	52,03	1,17	9,59	93,81	0,96	8,11	79,7

Закони розподілу з позитивним ексцесом, зазвичай, використовуються для опису імпульсних завад. Закони розподілу з негативним ексцесом (наприклад, бімодальне) - для опису синусоїдальних завад.

У асимптотичному наближенні за критерієм максимальної правдоподібності показано, що основним вузлом приймача ДС, що забезпечує максимальне але можливе гасіння сильних негаусівських завад, є нелінійний безінерційний перетворювач, амплітудна характеристика Z_{ao} якого однозначно визначається ЦРІ завади.

Аналіз характеристик показав сильне (максимально можливе) гасіння завад при оптимальній характеристиці БНЗ і досить велике - під час застосування обмежувача при позитивному ексцесі розподілу. Причому характеристики E_K є найважливішими показниками негаусівських завад і можуть застосовуватися для грубої ідентифікації завад (наприклад, визначати імпульсні, синусоїдальні або флуктаційні негаусівські).

Зі збільшенням ексцесу E'_K розподілу (в позитивну або від'ємну сторону) асимптотично оптимальний коефіцієнт гасіння завад μ_{ao}^2 пропорційно E'_K збільшується.

2.3. Модель діагностики та визначення напружено – деформованого стану складних конструкцій

В основі структурної схеми, представленої на рис.2.5, запропоновано можливі варіанти використання вихідного сигналу в мостовій вимірювальній схемі з двома тензорезисторами, що включено в плечі моста згідно диференціальної схеми підключення.

Під дією вимірюваного зусилля починає деформуватися пружний чутливий елемент, в якості якого може бути використано балку рівного опору або це може бути конструкція довільної форми, на поверхню якої наклеюються тензорезистори.

Вихідний сигнал мостовій нерівноваженій вимірювальній схемі подається на вхід електронного підсилювача (рис.2.5) з постійним та відомим коефіцієнтом підсилення [142 - 147].

Вихідна напруга нерівноваженого моста визначатиметься за формулою (2.43) за умови, що опори всіх плечей у стані рівноваги мають значення R_0 , а напруга джерела живлення є постійною, тобто $E = \text{const}$ [142 - 147]:

$$\Delta U_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{E \varepsilon_R}{1 + \frac{R_0}{R_H} \left(1 - \frac{(\Delta R / R_0)^2}{2} \right)}, \quad (2.43)$$

де R_H – опір навантаження на виході з мостової схеми (вхідний опір електронного підсилювача або відносна зміна опору кожного з тензометрів).

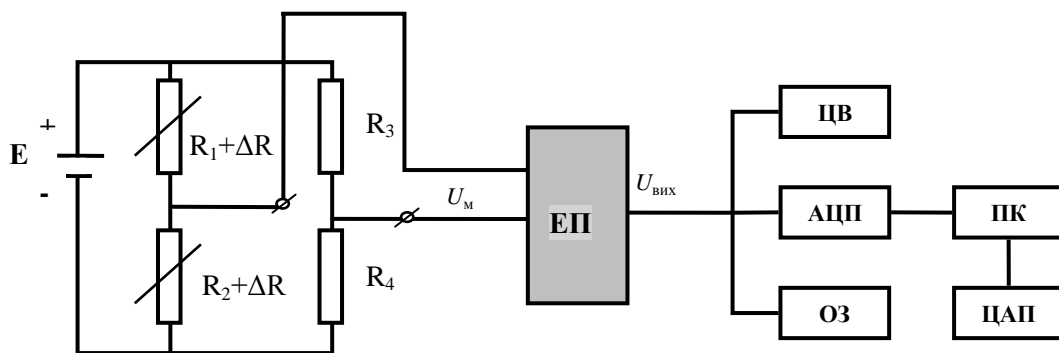


Рис. 2.5 – Структурна схема вимірювальної приладової системи:
 ЕП - електронний підсилювач постійного струму; ЦВ - цифровий вольтметр;
 АЦП – аналого - цифровий перетворювач; ОЗ - запам'ятовуючий осцилограф; ПК - персональний комп'ютер; ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

Для переважної більшості підсилювачів постійного струму можна прийняти, що їхній вхідний опір $R_H \gg R_0$. Тоді деформація визначатиметься:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}, \quad (2.44)$$

Матимемо:

$$\Delta U_M = \frac{1}{2} E \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (2.45)$$

Отже, між вимірюваною деформацією (зусиллям), яка викликає зміну опору тензорезисторів із значеннями $R_0=R_1=R_2$ до значень $R_0 \pm \Delta R$ і вихідною напругою у мостовій схемі існує, практично, лінійна залежність [142 - 147].

Отже, вихідний сигнал підсилювача $U_{\text{вих}}$ (рис. 2.5), що містить коефіцієнт підсилення напруги K_y , буде представлений виразом [142 - 147]:

$$U_{\text{вих}} = K_y \Delta U_{MM} = \frac{1}{2} K_y E \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (2.46)$$

Згідно рис.2.5, в залежності від того, яка є форма подання результатів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, вихідний сигнал може бути подано на вхід до різних вимірювальних та перетворюючих пристроїв. Для того, щоб представити результат вимірювання у цифровій формі, $U_{\text{вих}}$ вимірюється за допомогою цифрового вольтметра ЦВ, вихід якого може бути під'єднано до самостійно - цифродрукувального пристрою (ЦДП) для можливості паперового фіксування даних результатів вимірювання та їхньої документальної реєстрації [142 - 147].

У випадку, коли є необхідність обробки вихідної інформації за заданим алгоритмом, тоді $U_{\text{вих}}$ подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), на виході з якого інформативний сигнал може подаватися у вигляді коду на певний запам'ятовуючий пристрій (в даному випадку – на запам'ятовуючий осцилограф ОЗ). Після обробки результатів вимірювання дані виводяться на цифродрукувальний пристрій (ЦДП). [142 - 147].

Для дистанційних вимірювань напружено – деформованого стану необхідно, щоб датчик діагностики деформації включав хоча б один сенсорний елемент.

Запропоновано структурну схему сенсора деформації (рис. 2.6), на якій показано в якості вхідної величини деформацію ε_x , що впливає на навантажувальну конструкцію або окремий її елемент та спричиняє механічні напруження σ_x , які передаються спочатку на аналого-цифровий перетворювач, а згодом - на чутливий елемент.

Разом з тим, від зовнішнього джерела живлення на чутливий елемент подається потік енергії E , що являє собою напруження, струм або частоту, котрі модулюються за допомогою мінливих параметрів чутливого елемента, які, у свою чергу, залежать від величини деформації ε_x [142 - 147].

Крім того, як вже зазначалося в п. 1.3., в реальних умовах експлуатації на сенсори деформації впливають чинники зовнішнього середовища, серед яких найбільш вагомим чинником є температура $T_{\text{вн}}$.

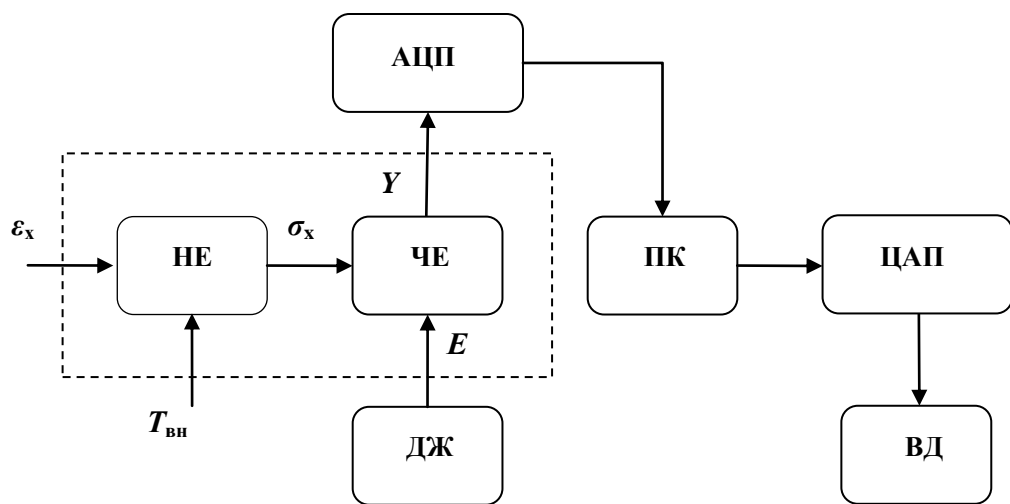


Рис. 2.6 – Структурна схема сенсора деформації:

НЕ – навантажувальний елемент; АЦП – аналого - цифровий перетворювач; ЧЕ – чутливий елемент; ДЖ – джерело живлення; ПК – персональний комп'ютер; ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач; ВД – вивід результатів на друк; ε_x – деформація; $T_{\text{вн}}$ – температура; σ_x – механічне напруження; Y – сигнал; E – потік енергії

На виході чутливого елемента сенсора деформації виникає сигнал Y , який пов'язаний з параметрами ε_x , E , $T_{\text{вн}}$ функціонально, тобто:

$$Y = F(\varepsilon_x, E, T_{\text{вн}}), \quad (2.47)$$

Приладові системи, оснащені електронним вимірювальним каналом, являють собою ланцюг функціональних ланок, що поєднують чутливий елемент сенсора ЧЕ з засобами обробки отриманої інформації [142 - 147].

Слід зазначити, що при розробці сенсорів вимірювання механічних величин, зокрема параметрів напружено – деформованого стану, в першу чергу слід звернути увагу на чутливі елементи ЧЕ та дослідити їх технічні характеристики в діапазоні температур широкого застосування [142 - 147].

Для сенсорів напружено – деформованого стану слід застосовувати вторинні перетворювачі з цифровою обробкою, що дозволяють коригувати характеристики перетворення деформації у сигнал програмним способом. Це дозволяє здійснювати її ефективну корекцію та лінеаризацію, що, в свою чергу, дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання [142 - 147].

Температурна корекція сигналу сенсора деформації здійснюється у такому порядку: контролер отримує певне значення від термочутливого елемента та вибирає у програмній пам'яті, наприклад, певне значення коефіцієнта тензочутливості саме для цього діапазону. За отриманим значенням визначається значення деформації [142 - 147].

Встановлено, що для перетворення малих сигналів з високою роздільною здатністю добре підходять сигма-дельта аналого-цифрові перетворювачі, за допомогою яких аналогові сигнали перетворюються у цифрові. Використання саме сигма-дельта аналого-цифрових перетворювачів з вбудованими інструментальними підсилювачами дає змогу перетворити вихідний сигнал сенсора у цифру. Таким чином, аналого-цифрові перетворювачі такого плану містять вбудований інструментальний

підсилювач з запрограмованим коефіцієнтом підсилення. Така конфігурація дозволяє отримати належний рівень вихідного сигналу [142 - 147].

2.4. Математична модель вимірювання деформацій тензорезисторним датчиком

Аналіз літературних та інформаційних джерел показав (розділ 1), що при вимірюванні деформацій застосовуються на сьогоднішній день недостатньо продуктивні методи та способи вимірювань, які не задовольняють сучасним вимогам щодо точності та швидкодії вимірювань [64, 147].

Відомо, що для пружних елементів їх чутливість може коливатися в широких межах через мінливість конструктивних коефіцієнтів чутливості.

Приймаємо, що конструктивний коефіцієнт чутливості дорівнюватиме максимальному значенню деформації для даної зони. Тоді для можливості характеризувати зміни даного коефіцієнта у залежності від значення деформації і місцезнаходження зони деформації на пружному елементі, було введено поняття коефіцієнта використання деформації.

Таким чином, залежність відносної зміни опору від деформації набуде виду [145 - 147]:

$$\varepsilon_R = CS\varepsilon, \quad (2.48)$$

де ε_R – відносна зміна опору тензорезистора; ε – відносна деформація зони пружного елемента; S – коефіцієнт тензочутливості; C – коефіцієнт використання деформації.

Коефіцієнт використання деформації вказує на частку максимальних деформацій зони на пружному елементі.

Оскільки деформація є прямо пропорційною конструктивному коефіцієнту, тобто чутливості, тоді коефіцієнт використання деформації розраховується як відношення середньої чутливості до максимальної чутливості:

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{cp}}}{\varepsilon_{\text{max}}} = \frac{S_{\text{cp}}}{S_{\text{max}}} = \frac{B_{\text{cp}}}{B_{\text{max}}}, \quad (2.49)$$

де ε_{cp} – відносна деформація; S_{cp} – коефіцієнт тензочутливості; B_{cp} – конструктивний коефіцієнт (чутливість) пружного елемента відповідно до робочої деформації; ε_{max} – максимальна деформація; S_{max} – максимальний коефіцієнт тензочутливості; B_{max} – максимальний конструктивний коефіцієнт (чутливість) зони деформацій пружного елемента [144 - 147].

Тоді коефіцієнт використання деформацій буде визначатися як середнє значення середніх конструктивних коефіцієнтів зон деформацій (чутливостей), що використовуються під улаштування тензорезисторів:

$$C = \frac{B_{1\text{cp}}, B_{2\text{cp}}, \dots, B_{n\text{cp}}}{n}, \quad (2.50)$$

де $B_{1\text{cp}}, B_{2\text{cp}}, \dots, B_{n\text{cp}}$ – середні конструктивні коефіцієнти зон деформацій (чутливості) пружного елемента; n – число пружних елементів зон, що використовуються.

Як видно з (2.48), значення коефіцієнта використання деформації характеризується ефективністю перетворення деформації пружним елементом. Тоді найбільша ефективність перетворення деформації виходить в того елемента, у якого величина C_z є найбільшою. Таким чином, найбільш

ефективною конструкцією є балка рівного опору, що затиснена одним кінцем, а найменш ефективною є мембрана [145 - 147].

Тому при проектуванні датчиків для пружних елементів або виборі зони деформацій виникає необхідність розрахунку коефіцієнта деформації .

На рис. 2.7. наведено схему тензорезисторного датчика деформацій, що являє собою послідовність двох з'єднаними між собою вимірювальними перетворювачами: тензорезистором і вимірювальним ланцюгом.

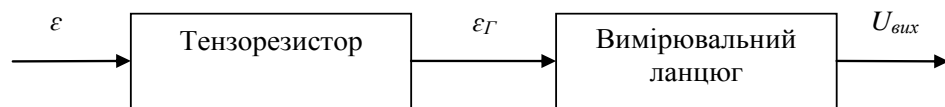


Рис. 2.7 – Схема датчика деформацій

Розрахунок тензорезисторного датчика деформацій може бути здійснений у такій послідовності [68, 145 – 147, 156, 157]:

1. За відомою або прийнятою $\varepsilon_{\text{ном}}$ і номінальним вихідним сигналом $U_{\text{вих}}$ визначається номінальна чутливість датчика деформацій [145 – 147]:

$$S_{\text{д ном}} = U_{\text{вих}} / \varepsilon_{\text{ном}} ,$$

для датчика механічних напружень номінальна деформація буде визначатися за формулою[68, 156, 157]:

$$\varepsilon_{\text{ном}} = \sigma_{\text{ном}} / E ,$$

де $\sigma_{\text{ном}}$ – номінальне механічне напруження; E – модуль пружності матеріалу об'єкта вимірювання.

2. У відповідності до технічного завдання обирається схема вимірювального ланцюга.

3. За номінальною чутливістю датчика та заданою напругою живлення виконується розрахунок коефіцієнта тензочутливості:

$$S_d = U \frac{knC_z S}{(k+1)^2}.$$

4. За значенням коефіцієнта тензочутливості обирається тип тензорезистора.
5. За заданою напругою живлення й припустимим струмом розраховується опір тензорезистора.

6. За формулою $W = \frac{nt + \sqrt{n^2 t^2 + 4ntl}}{4nt}$ [145] розраховується число витків тензорезистора й визначаються геометричні розміри тензорезистора.

7. За необхідності, виконуються розрахунки компенсаційних опорів.
8. Визначається фактичний номінальний вихідний сигнал та фактична чутливість датчика.

9. Калібрований опір (чутливість датчика) R_k розраховується за формулою:

$$R_k = (R + 2R_l) / nC_z S \varepsilon.$$

10. Визначається похибка вимірювання датчика.

Калібрований опір (фактична чутливість датчика), похибка вимірювання, напруга живлення, вхідний та вихідний опори датчика є основним вихідними характеристиками тензорезисторного датчика деформацій [145-147].

Висновки по розділу 2

1. Запропоновано підхід для оцінювання ресурсу конструкції, зокрема залишкового ресурсу при малоцикловій та багатоцикловій втомі, що базується на моделюванні основних фізичних стадіях розвитку процесу вичерпування ресурсу.
2. Здійснено синтез структури засобів та приладів вимірювання деформацій і механічних напружень, а також методики розрахунку тензорезисторного датчика деформацій.

3. Запропоновано нову структурну схему виміральної приладової системи із застосуванням чутливих елементів - сенсорів з одночасною корекцією їхніх температурних залежностей, що дає змогу враховувати температурну залежність коефіцієнта тензочутливості внаслідок зміни температури оточуючого середовища. Для перетворення малих сигналів пропонується використовувати підсилювач із запрограмованим коефіцієнтом підсилення з високою роздільною здатністю аналого - цифрового перетворювача.
4. Встановлено, що для перетворення малих сигналів з високою роздільною здатністю заслуговують уваги сигма-дельта аналого-цифрові перетворювачі, за допомогою яких аналогові сигнали сенсорів перетворюються у цифрову форму. Застосування таких перетворювачів з вбудованим інструментальним підсилювачем з програмованим коефіцієнтом підсилення дає змогу перетворити вихідний сигнал сенсора та отримати необхідний рівень вихідного сигналу.
5. На підставі аналітичних рівнянь для симетричних одновимірних ЩРІ завад (узагальненого гаусівського, бімодального, бігаусівського) отримані аналітичні вирази для Z_{ao} і μ_{ao}^2 , а також ексцесу E_K і коефіцієнта гасіння завад $\mu_{p.o.}^2$ в ідеальному обмежувачі. Наведено чисельні розрахунки зазначених характеристик.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ ПОБУДОВИ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

Створення інтелектуальних інформаційно-вимірjuвальних приладових систем, за допомогою яких відбувається збір даних глобального або локального структурного моніторингу складних інженерних споруд, значно полегшує оцінку умов безпеки конструкцій та розробку стратегій щодо їхньої безпечної експлуатації.

Невід'ємною частиною таких приладових систем є багатоканальні системи збору даних (СЗД) від датчиків, які містять як аналогову, так і цифрову частину. Аналогова частина включає підсилювачі, комутатори, АЦП, джерела опорних напруг та інші аналогові пристрої.

Інтегрування аналогової і цифрової частин СЗД призвело до створення аналого-цифрових мікропроцесорів, що містять вбудовані АЦП / ЦАП і деякі додаткові аналогові функціональні пристрої.

Слід підкреслити, що в приладовій системі вимоги до швидкодії АЦП / ЦАП значно нижчі в порівнянні з медійними додатками і системами зв'язку, однак вимоги до точності та надійності вищі. Тому АЦП / ЦАП і периферія системи збору даних розглядаються, в основному, під цим кутом зору. Крім того, враховується також техніко- економічні показники, що впливають на вартість такого моніторингу складних інженерних споруд

В даному розділі розроблено структуру приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану, в основі якої закладено модель автоматизованої системи діагностування.

Розроблено математичну модель вимірювання деформацій за допомогою тензорезисторних датчиків, що визначає взаємозв'язок між

вихідним сигналом тензоперетворювача та механічним напруженням, яке виникає при деформації.

Розроблено модуль вимірювання напружено – деформованого стану на базі аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків.

За допомогою програмного середовища NUMERY було визначено регресійне рівняння функції перетворення вимірювального каналу, що дозволило визначити систематичні та випадкові складові похибки вимірювального каналу без врахування похибок датчика.

За результатами досліджень, що висвітлено у даному розділі, автором були опубліковані роботи [21, 24, 32-47, 61, 72].

3.1. Сучасні тенденції створення

приладових систем вимірювання механічних величин

Створення сучасних приладових систем потребує вирішення багатьох наукових, організаційних і технічних проблем, вирішення яких можливе шляхом розвитку теоретичних основ, методів технічної кібернетики, системотехніки, системного аналізу і теорії прийняття рішень, штучного інтелекту, інформатики, прикладної математики, створення сучасних технічних засобів досліджень, основи яких створено як вітчизняними вченими, так і вченими зарубіжжя: Альтшулером Г. С., Глобою Л. С., Гермейером Ю. Б., Глушковым В. М., Квасніковим В. П., Красовським А. О., Якубайтисом Є. А. та іншими [45].

Працями цих учених створено нові напрями проектування сучасних об'єктів і систем, до яких увійшли цілі розділи з розвинутими методами досліджень: методи геометричного, фізичного і математичного моделювань. Віддаючи належне здобуткам цих дослідників, зауважимо, що, незважаючи на значний обсяг публікацій з даної тематики, ними не охоплено усієї сукупності питань таких складних та багатовимірних процесів, якими є

проблеми автоматизації процесів конструювання, зокрема приладових систем, тому необхідні подальші наукові дослідження, які б ґрунтувались на теоретичних та практичних надбаннях учених та практичних фахівців [45].

На даному етапі розвитку науково-технічного прогресу гостро постає питання про створення інтелектуально-вимірювальних надійних приладових систем із застосуванням технологій штучного інтелекту, методів статистичного моделювання, що дозволять ефективно вирішувати задачі, пов'язані з вимірюванням механічних величин, зокрема параметрів напружено – деформованого стану [45].

В останні роки спеціалісти приходять до висновку, що використання методів розрахунків, які пропонує теорія надійності, дозволяє зробити суттєвий крок вперед до підвищення надійності та ефективності складних технічних систем, до яких відносяться приладові системи. Тому актуальним є поглиблене вивчення теорії надійності для елементів приладових систем та застосування її для вдосконалення конструктивних елементів даних систем[45].

Задача підвищення якості матеріалів, виробів, обладнання, що веде за собою підвищення рівня їхньої експлуатаційної надійності завжди була актуальною. Але при цьому слід зберігати паритет між оптимальним рівнем експлуатаційної надійності виробу та його економічністю, оскільки вимоги надійності і економічності знаходяться в протиріччі [45, 61, 72].

Підвищення надійності, що із збільшенням вартості виробу, зокрема приладової системи при її створенні, потребує менших витрат на експлуатацію, і навпаки: здешевлення приладової системи приводить до зниження рівня надійності, для підтримання якого необхідно нести більші експлуатаційні витрати (рис. 3.1) [45, 73].

Оптимальний рівень надійності H_{opt} визначається шляхом співставлення витрат на підвищення надійності і величини втрат від її зниження (рис. 3.1) [45, 62].

Допустимий мінімальний рівень надійності H_{\min} встановлюють шляхом порівняння витрат $B(t)$ на технічне обслуговування і ремонт із збитками $3(t)$, спричинених зниженням рівня надійності [45, 61, 72, 74]. Якщо $3(t) > B(t)$, то потрібно проводити ремонтно-відновлювальні роботи, а якщо $3(t) < B(t)$, то проведення ремонтних робіт недоцільне (рис. 3.1) [45].

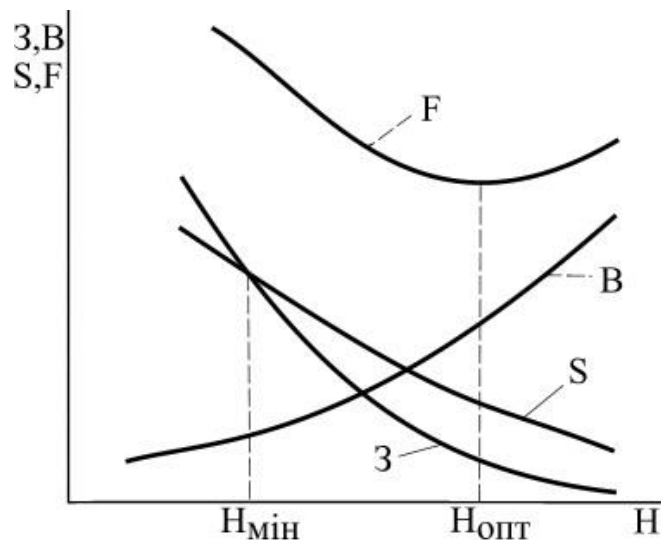


Рис. 3.1 – Залежність рівня надійності приладової системи від збитків, витрат на утримання, витрат на підвищення рівня надійності:
 S – витрати на утримання;
 B – витрати на підвищення рівня надійності;
 3 – збитки від зниження рівня надійності;
 F – сумарні витрати.

Пошкодження, відмови, аварії на об'єктах будь-якої технічної системи, в тому числі приладової системи, приводять до збитків (рис. 3.2) [45]. Щоб зменшити збитки $3(t)$, необхідно додатково нести витрати на своєчасне технічне обслуговування і ремонт $B(t)$. Таким чином, загальні витрати можуть бути оптимізовані за рахунок мінімізації цієї суми [45].

В цьому випадку функція оптимізації ефективності роботи системи буде мати вигляд [45]:

$$F(t) = [3(t) + B(t)] \longrightarrow \min, \quad (3.1)$$

де $F(t)$ – сумарні втрати; $З(t)$ – збитки внаслідок відмов елементів приладової системи; $B(t)$ – витрати на технічне обслуговування і ремонт.

Рівень надійності, що відповідає величині F_{\min} , можна рахувати оптимальним рівнем надійності H_{opt} [45].

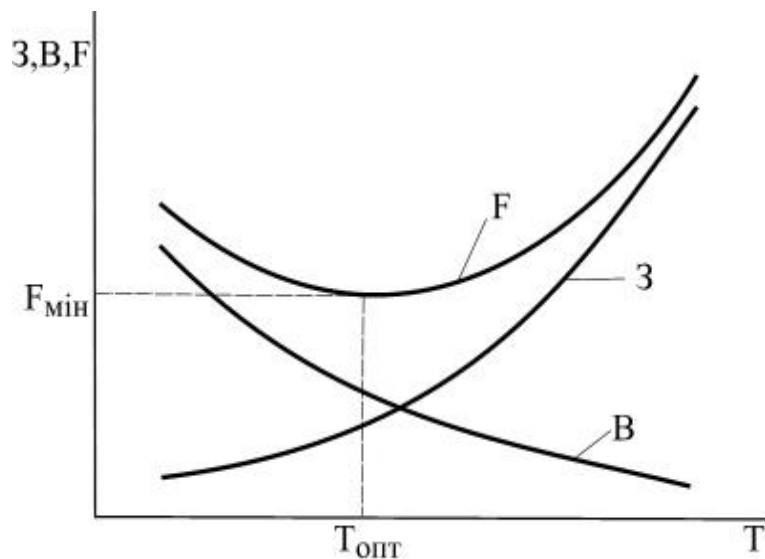


Рис. 3.2 – Залежність збитків і витрат на ремонт від тривалості втрати працездатності приладової системи:

З – збитки від втрати працездатності приладової системи;

В – витрати на технічне обслуговування і ремонт;

F – сумарні втрати.

Аналіз публікацій і нормативів показав, що розрахунки надійності приладових систем нормами проектування, виробництва та експлуатації не регламентовані, відсутні кількісні показники надійності елементів систем та методи їх розрахунку. Розрахункових моделей надійності приладових систем не розроблено через складність моделювання. Первинна інформація про надійність приладових систем розрізнена по різним джерелам, немає єдиної методики оцінки технічного стану систем, розмірності однойменних критеріїв часто не співпадають [45].

Повний життєвий цикл будь-якого об'єкта, в тому числі складної технічної системи, якими є приладові системи, супроводжується комплексом

завдань з оцінки його надійності: розрахунок показників надійності на ранніх етапах проектування, підтвердження досягнутого рівня надійності експериментальними методами на кінцевих етапах проектування і виробництва, визначення норми запасних частин для забезпечення надійності в процесі експлуатації [45].

Рішення цих завдань передбачає використання тої чи іншої моделі відмов, яка забезпечує, по-перше, рішення цих завдань, а по-друге, збіжність результатів під час визначення розрахункових та експериментальних оцінок [45, 66].

Функція розподілу, використовувана як модель відмов, повинна дозволяти вирішувати такі основні завдання [45]:

- розрахунок показників безвідмовності приладової системи;
- розрахунок довговічності приладової системи;
- розрахунок комплексних показників надійності, включаючи ремонтпридатність та збережуваність приладової системи;
- планування визначальних та контрольних випробувань на надійність;
- оцінка надійності приладової системи за експериментальними даними.

Отже, для забезпечення необхідної на сьогоднішній день точності вимірювання параметрів напружено – деформованого стану необхідно враховувати сучасні технології на основі інформаційних систем із застосуванням теорії надійності, системного аналізу, штучного інтелекту, методів статистичного моделювання та ін. [45].

Однак не слід забувати про економічність даного питання, оскільки вимоги надійності і економічності знаходяться в протиріччі. Тому в подальших дослідженнях і технічних розробках слід приділити увагу визначенню оптимального технічного рівня приладової системи вимірювання механічних величин з точки зору її експлуатаційної надійності [45].

3.2. Методологія побудови приладових систем вимірювання механічних величин

Сучасні приладові системи містять первинні датчики механічних величин (сенсори), які встановлюються на об'єкті вимірювання (датчики руху, тиску, температури, деформації і т. д.), пристрої посилення і нормалізації сигналів датчиків, аналоговий мультиплексор (або комутатор сигналів), який використовується для почергового підключення сигналів датчиків до аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) через пристрій вибірки та зберігання (рис. 3.3).



Рис. 3.3 – Структурна схема приладової системи

Подібні багатоканальні вимірювальні приладові системи часто називають системами збору даних (СЗД). В одноканальному варіанті їх називають вимірювальними перетворювачами. І в тому, і в іншому випадку на виході формуються оцифровані сигнали датчиків.

Ці сигнали через інтерфейс вводяться в процесор або ПК з відповідною необхідною периферією (дисплей, клавіатура і т.д.), обробляються за певними алгоритмами, документуються і видаються в зручному вигляді користувачеві (оператору) за допомогою пристроїв відображення інформації (ПВІ). В автономних або спеціалізованих вимірювальних приладових системах замість ПК можуть застосовуватися більш дешеві контролери з автономними пристроями відображення інформації: рідкокристалічні індикатори, газорозрядні панелі тощо.

Якщо цю структуру доповнити цифроаналоговими перетворювачами (ЦАП) і виконавчими пристроями, то вона стає інформаційної керуючою приладовою системою (ІКПС), яка керує об'єктом по ланцюгу зворотного зв'язку відповідно до заданого алгоритму. Така структура характерна, наприклад, для більшості автоматизованих систем управління технологічними процесами в мікроелектроніці та робототехніці.

В складних технічних ІКПС для забезпечення високого рівня надійності застосовують велику кількість датчиків для контролю та вимірювання фізичних величин. Наприклад, у виробках авіаційної і космічної техніки кількість датчиків коливається від 250 до 2000. Комплексне автоматизоване обладнання для виробництва інтегральних мікросхем фірми Applied Materials містить близько 1000 датчиків безпосередньо в технологічному процесі і близько 600 в інженерному обладнанні.

Датчики та вимірювальні перетворювачі, що перетворюють механічні величини в електричні сигнали, стали найважливішими елементами приладових систем. У багатьох випадках це складні пристрої, створені із застосуванням сигнальних процесорів. Саме вони і ПВІ в значній мірі визначають якість і вартість приладової системи. Особливо перспективні за метрологічними і експлуатаційними характеристиками вимірювальні перетворювачі і ПВІ, створені за технологією мікро-електроніки і мікроелектромеханічних систем.

Попит на датчики і вимірювальні перетворювачі безперервно зростає і щорічно збільшується на 10-25%. Ще більші темпи зростання зафіксовані в області ПВІ (до 40%), де вже набули широкого застосування світлодіоди на органічних полімерах. У найближчі роки найбільші темпи зростання споживання датчиків прогнозується в автомобілебудуванні, суднобудуванні, будівництві, аерокосмічній і технологічних галузях промисловості, військовій справі.

Прогрес в області розробки приладових систем в даний час і в найближчому майбутньому пов'язаний, в основному, з досягненнями мікроелектроніки, яка дозволяє створювати на традиційних принципах перетворення (тензорезистивного, п'єзоелектричного, гальваномагнітних, фото-електричного та ін.) компактні і надійні інтелектуальні вимірювальні перетворювачі низької вартості. При цьому точність вимірювань зростає до 0,1% при експлуатації в екстремальних умовах.

В більш віддаленому майбутньому все більший вплив матимуть методи побудови датчиків, засновані на раніше мало поширених фізичних принципах (наприклад, магнітооптичному, волоконно-оптичному тощо), а також на застосуванні високотемпературної надпровідності, нових матеріалів (рідкоземельних, композитних і високотемпературних напівпровідників, наприклад карбіду кремнію) і перспективних технологіях, в першу чергу на технології мікроелектромеханічних систем та нанотехнологіях.

3.3. Структура приладової системи вимірювання напружено-деформованого стану

Для складних інженерних конструкцій, окрім традиційних критеріїв міцності та надійності, слід відокремити похідні з теорії надійності в окремі нові критерії – живучість та безпека. Загальний комплекс робіт по визначенню вихідного та залишкового ресурсу, живучості та безпеки елементів складних технічних об'єктів, таких як гідроелектростанції,

ракетно-космічні комплекси, літальні апарати, об'єкти суднобудування, атомні станції тощо обов'язково повинен включати в себе дослідження навантажень, напружень та деформацій. На сьогоднішній день існує ряд методів для здійснення таких досліджень, зокрема розрахунковий метод, аналітичний, метод кінцевих елементів, варіаційно-різницевого методу, метод граничних інтегральних рівнянь на моделях із застосуванням фотопружності, голографії, низькомодульних матеріалів тощо [47, 62, 73, 84].

Невизначеність компонентів моделі проектування складної технічної системи призводить до необхідності розгляду задачі прийняття рішення про її синтез з позиції системного підходу, тобто проведення дослідження за послідовно спадаючими рівнями узагальнення з врахуванням комплексу міжрівневих та внутрішніх взаємозв'язків. Верхній рівень прийняття рішення по синтезу складної конструкції є концептуальним. В якості координуючої основи дослідження ієрархії та аспектів складної конструкції можна застосувати концепцію управлінської системи, сформульовану С. В. Яблонським [100]. Так, для складної технічної системи дана концепція має таке тлумачення: «Складна технічна конструкція, як управлінська система, діє на інший об'єкт методом керування з метою спрямування останнього у відповідний стан чи позицію». Дана концепція дозволяє виконати формалізацію мети для складної технічної конструкції, побудувати ієрархію її підсистем, визначити дерево цілей і задач [47].

Далі виконуються комплексні програмні дослідження і проводиться уточнення розрахункового ресурсу [101-104]. Хоча пошук системних підходів до прийняття рішень при проектуванні складних конструкцій здійснюється постійно, необхідність у них з кожним роком стає більш значимішою [47].

Вирішення проблеми зниження вартості технічного обслуговування складних інженерних конструкцій можливе на основі впровадження технічної діагностики як сукупності засобів і методів безперервного

контролю. Саме такий контроль можливий за рахунок впровадження автоматизованих систем діагностування (АСД) [47].

Досвід створення автоматизованих систем діагностування технічного обладнання дозволяє визначити ряд основних принципів щодо розробки таких систем [6, 8, 9, 10]. Слід відзначити також, що формулювання і систематизація основних положень функціональності та технологічності складних технічних систем дозволяють визначити круг задач, які підлягають вирішенню внаслідок побудови такої автоматизованих систем діагностування. У випадку розгляду складних технічних конструкцій в умовах експлуатації, на передній план постає питання діагностування напружено-деформованого стану таких конструкцій [47].

Важливе значення для створення автоматизованих систем діагностування мають методи діагностування, які визначають трудомісткість діагностування, тривалість та об'єм розрахункових процесів, складність апаратних та програмних засобів, продуктивність системи, надійність діагностичної інформації, ступінь повноти діагностування та глибину пошуку [47, 104, 108].

При оцінюванні структури приладової системи здійснюється шляхом введення поняття ефективності для складних конструкцій, що враховує стратегію проектування u ($u \in U$ як мінімум ресурсоспоживання для досягнення мети); критерій ефективності технічного рішення, що визначає правила раціональної поведінки складної конструкції у вигляді оптимізації процесів досягнення фіксованої мети $K(u)$; показник ефективності $W(u)$ – інтегральний показник якості складної конструкції. Для запроектованих складних конструкцій $W(u) \in 0 \div 1$ - скаляр, значення якого має бути максимальним.

Морфологічний аналіз існуючих вимог дозволяє сформулювати наступні визначальні параметри [47]:

$m_{ск}$ – задана маса складної конструкції;

t – задана оперативність;

H – задана відстань переміщення складної системи (висота);

A – ресурсоспоживання, необхідне для досягнення мети.

На основі теорії розмірності [9], що була застосована нами для опису технологічного процесу складної технічної конструкції з рухомими частинами, та здійсненого нами морфологічного аналізу існуючих вимог щодо технологічної ефективності такої конструкції, було визначено вид функції X при параметричному згортанні параметрів [47]:

$$X(T) = G \frac{m_{ck} T H_{max}^2}{t^3 A}, \quad (3.2)$$

де G – стала прогнозованої ефективності складної технічної системи;

T – час функціонування складної технічної системи на момент здійснення аналізу;

H_{max} – максимальна відстань переміщення складної технічної системи.

На наступному, операційному рівні, вирішується проблема вибору технології складної конструкції (технологічних операцій виготовлення та введення в експлуатацію). Синтез функцій підготовки та введення в експлуатацію здійснюється на основі вирішення задачі Понтрягіна [102] для лінійних та нелінійних рівнянь, що описують технологічні процеси [47].

Модель технологічних процесів описується системою рівнянь [47]:

$$F_i \left(w_i, \dot{w}_i, \dots, w_i^{(k)}, \xi, \dot{\xi}, \dots, \xi^{(k)}, t \right) = 0, \quad (3.3)$$

$$i = 1, \dots, l; \quad w_i \in R^q, \quad \xi \in R^s$$

де ξ – узагальнена координата стану складної конструкції з R^q (гладка функція часу); w_i – змінні з R^s , що характеризують зміну зовнішніх параметрів, таких як тиск, щільність, напруження, температура тощо; R^q – q -

мірний вектор зовнішніх параметрів; R^s – s -мірний вектор станів складної конструкції.

При такій постановці проблеми синтезу технологій, використовуючи аналітичні положення теорії систем [6], можна довести наступні теоретичні положення [47]:

1. Для технологічних процесів, що описуються лінійними рівняннями, всі агрегати і пристрої, що реалізують процеси просторового переміщення об'єктів складної конструкції, для яких допустиме поняття абсолютного твердого тіла, можуть мати опис цих процесів у вигляді лінійних диференціальних рівнянь. Дане положення дозволяє сформулювати та довести теорему про те, що мінімальна реалізація процесів просторового переміщення цільового об'єкта при підготовці до експлуатації відповідає на функціонально-аналітичному рівні одному для кожного із цільових об'єктів конструкції [47].
2. Для технологічних процесів, що описуються нелінійними рівняннями, всі механічні системи, що забезпечують створення необхідних потоків суцільних середовищ між рухомими частинами і наземною структурою конструкції, описуються фізичними закономірностями у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь. Дане положення дозволяє сформулювати та довести теорему про те, що мінімальна реалізація механічних потокових процесів, котрі супроводжують процес підготовки і введення в експлуатацію конструкції, досягається за умови вибору технологічних функцій, що протікають у вигляді процесів. Дані процеси не мають нестационарну домінанту або допуску їхньої лінеаризації [47].
3. Структура елемента конструкції, що допускає формалізацію у вигляді поєднання пари елементів, має мінімальну параметричну реалізацію, що відповідає її максимальній ефективності в досягненні поставленої мети, якщо граф у структурі елемента конструкції містить досконале парю поєднання [47].

Дане положення дозволяє сформулювати та довести теорему про те, що досконалій структурі конструкції при мінімальній затраті ресурсів на реалізацію заданих цілей відповідає дворядний граф з досконалим паром поєднанням [47].

Мінімізація затрат ресурсів на реалізацію надійної роботи складної технічної системи обумовлює створення та впровадження автоматизованих систем діагностування та вимірювання [47].

Можна розглядати автоматизовану приладову систему вимірювання АПС як специфічну систему управління, специфіка якої полягає саме в управлінні технічним станом об'єкта діагностування (ОД), і тому при створенні АПС використовуються деякі принципи теорії систем управління та контролю. Отже, автоматизована приладова система вимірювання АПС є сукупністю об'єкта діагностування, апаратно-програмних засобів та оперативного персоналу [47].

Включення в систему кожного із названих елементів передбачає їхній взаємозв'язок, взаємний вплив та необхідність узгодження характеристик, що визначає системний підхід до створення засобів діагностування (рис. 3.4). Це обумовлює необхідність монтування первинних перетворювачів в конструкцію ОД, розробки автоматизованих методів діагностування, а також засобів, здатних надійно функціонувати в умовах експлуатації та своєчасно видавати оператору інформацію у зручній формі, а також вимагає узгодження енергетичних та часових характеристик елементів автоматизованої приладової системи вимірювання АПС [47].

Конструкція і технологічне призначення об'єкта визначає структуру автоматизованої приладової системи вимірювання АПС: види основних та допоміжних діагностичних параметрів, їхні граничні рівні вимірювання та частотні властивості; необхідну точність вимірювання та розрахунку діагностичних критеріїв; вид зв'язку та топологію системи; алгоритми діагностування об'єкта і його структурних одиниць; можливу глибину і

точність діагностування; місце знаходження і умови роботи оператора тощо [47, 105].

В якості ОД розглядаємо, наприклад, сталеві конструкції затворів гідротехнічних споруд з єдиним центром управління. Для цих об'єктів розроблені зовнішня система діагностування (СД) та дві вмонтовані СД, що призначені для функціонування у складі об'єктів технологічного обладнання в умовах експлуатації [47, 105].

Первинність мети та методів для синтезу апаратно-програмних засобів очевидні. Метою діагностування є отримання інформації про технологічний стан ОД, на основі якої здійснюється локалізація відмов і прогнозування залишкового ресурсу, а в ряді випадків здійснюється вплив на об'єкт, що попереджає створення аварійних ситуацій [47].

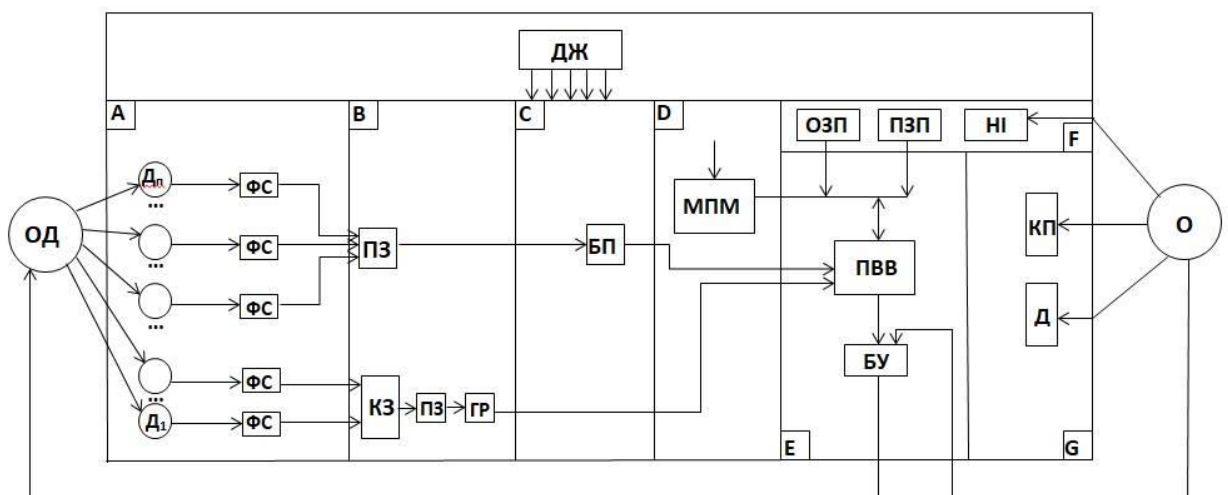


Рис. 3.4 – Структурна схема автоматизованої приладової системи (АПС) вимірювання НДС:

ОД – об'єкт дослідження; $D_1 \dots D_n$ – датчики; ФС – пристрій формування сигналів; ПЗ – передавач зв'язку; ГР – схема гальванічної розв'язки; КЗ – концентратор зв'язку; БП – блок перетворення; ДЖ – джерело живлення; МПМ – мікропроцесорний модуль; ОЗП та ПЗП – оперативний та постійний запам'ятовуючий пристрій; НІ – накопичувач інформації; КП – клавішний пристрій; Д – дисплей; БУ – блок управління; ПВВ – пристрій вводу – виводу; О – оператор.

В системах більш високого рівня забезпечується автоматичне корегування зміни робочих параметрів та стабілізація технологічного процесу на основі методів адаптивного управління [47].

На початковому етапі створення автоматизованої приладової системи вимірювання АПС на якісному рівні формується мета, яка при практичній реалізації формує набір цілей для блоків, що складають систему. Формування дерева цілей є складною задачею, оскільки необхідне чітке розуміння, що потрібно зробити і скласти точне формулювання термінів, характерних для даної системи [47].

Для вмонтованих інформаційно-діагностичних систем вихідна мета сформульована наступним чином: отримати інформацію про стан технологічного середовища і технічний стан об'єкта, а також забезпечити безпеку об'єкта при недопустимих змінах параметрів в процесі експлуатації. На основі даної вихідної мети були сформульовані технічні вимоги до системи в цілому та для кожного блоку окремо [47].

Мінімізація затрат ресурсів на реалізацію надійної роботи складної технічної системи обумовлює створення та впровадження автоматизованих систем діагностування (АСД) [47].

Можна розглядати АПС як специфічну систему управління, специфіка якої полягає саме в управлінні технічним станом об'єкта діагностування (ОД) та вимірювання НДС, і тому при створенні автоматизованих приладових систем діагностування та вимірювання НДС використовуються деякі принципи теорії систем управління та контролю. Отже, АПС є сукупністю об'єкта діагностування, апаратно-програмних засобів та оперативного персоналу [47].

Для зовнішньої інформаційно-діагностичної системи вихідна мета сформульована наступним чином: провести механічні вимірювання, порівняти значення робочих параметрів з заданими та оцінити якість виготовлення об'єкта. Ця система реалізована на основі використання ПК,

атестованих давачів робочих параметрів, метрологічного та програмного забезпечення [47].

При створенні автоматизованої системи діагностування АПС важливим є підбір методів діагностування. Саме метод діагностування пов'язує об'єкт, апаратні та програмні засоби в єдину систему, визначає алгоритми програм діагностування і дозволяє шляхом перетворення інформації, що міститься у змінах форми і частотного вмісту діагностичних параметрів, встановлювати взаємозв'язок між ознакою технологічного стану об'єкта і ознакою зміни структури вимірювальних сигналів [47].

При розробці математичного забезпечення використані методи амплітудно-часових інтервалів, метод контрольних рівнів та метод решітчастих функцій. Дані методи виявились ефективними та їхнє використання дозволило розробити алгоритм обробки інформації, провести формалізацію процедури встановлення діагнозу та зробити вибір розрахункового ядра автоматизованої приладової системи АПС вимірювання НДС [47].

3.4. Принципи побудови та проектування вимірювання перетворень деформацій та напружень

На основі здійсненого аналітичного огляду літературних джерел в галузі вимірювання та аналізу сучасних методів і засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану (розділ 1) встановлено, що напівпровідникові тензочутливі елементи наділені значно більшою тензочутливістю і високим рівнем вихідного сигналу вимірювальних схем в порівнянні з іншими засобами вимірювання.

Розроблено математичну модель вимірювання деформацій тензорезисторним датчиком, яка визначає взаємозв'язок між вихідним сигналом тензоперетворювача та механічним напруженням, яке виникає при деформації.

Опір елементарної ділянки провідного каналу з довжиною dx визначатиметься залежністю [141 - 147]:

$$dR_k = \frac{R_k}{L} dx = \frac{\rho dx}{ZW}, \quad (3.4)$$

де R_k – опір каналу, Ом; L – довжина каналу, м; ρ – питомий опір, Ом·м; Z – ширина каналу, м; W – глибина каналу, м.

На розподіл носіїв заряду у каналі значний вплив мають значення керуючого потенціалу (V_G) та напруги на виході тензоперетворювача (V_D). Тоді глибина каналу W на відстані x від входу визначатиметься залежністю [141 - 147]:

$$W(x) = \frac{Q_s(x)}{eN_D} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{SiO_2}}{eN_D d} \left[-V_G + V(x) + \frac{2kT}{e} \ln \frac{N_D}{\left(\sqrt{N_C N_V} \exp \left[\frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right] \right)} \right], \quad (3.5)$$

де ϵ_{SiO_2} – відносна діелектрична проникність діелектрика під керуючим електродом; d – товщина діелектрика, м; $V(x)$ – напруга на відстані x від входу тензоперетворювача, В.

Методика вимірювання напружень полягає у виборі параметрів електричних значень (V_G , V_D), електрофізичних значень (μ_n , κ_1 , N_D) та топологічних значень (L_0 , Z , d) в межах заданих діапазонів тензочутливого елементу, що розробляється, для яких функція перетворення $I_D = f(X)$ матиме реалізацію в певному заданому діапазоні механічних напружень з максимально можливими чутливістю, лінійністю та рівнем вихідного сигналу [141 - 147].

На рис. 3.5. наведено блок-схему послідовності визначення величини деформації під час її вимірювання.

Послідовність визначення деформації елемента конструкції містить наступні етапи [68, 141 - 147]:

1. Задаємося вихідними даними, а саме: набором напівпровідникових матеріалів з певними домішками N_D ; напругою на виході V_D та напругою на керуючому електроді V_G ; довжиною каналу L_0 , товщиною діелектрика d і шириною каналу Z .

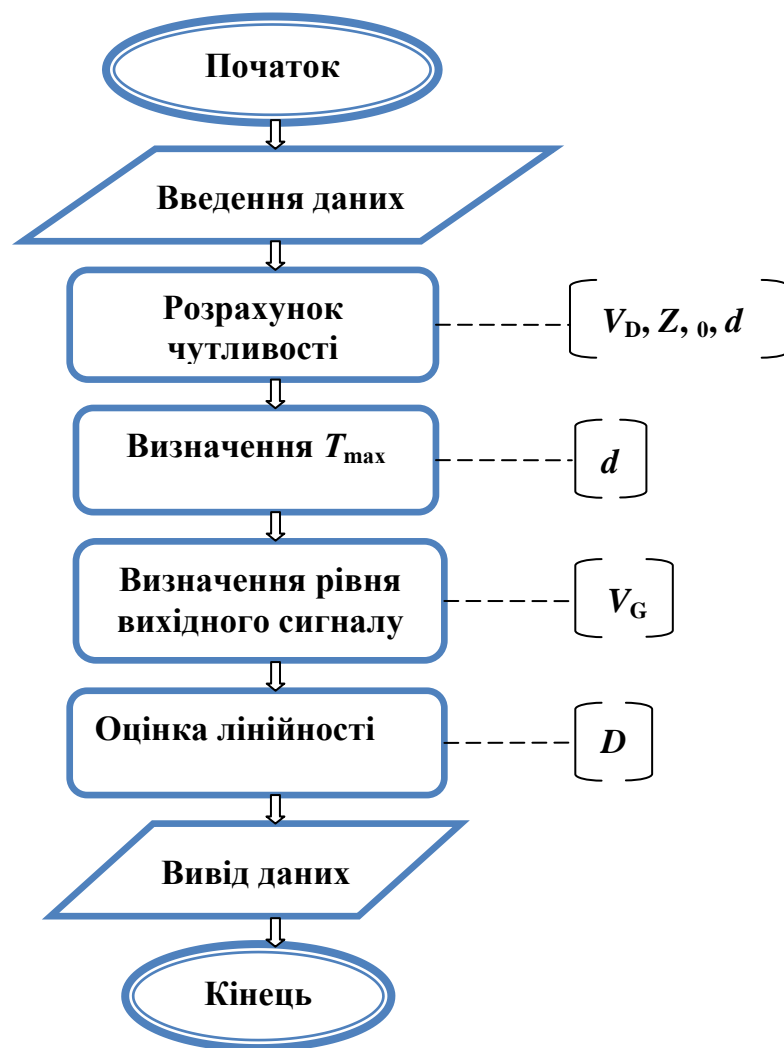


Рис. 3.5 – Блок-схема послідовності визначення величини деформації під час її вимірювання

2. Розраховуємо чутливість за формулою (3.6). Максимальне значення чутливості досягається вибором найбільших значень V_D , Z та найменших L_0 , d .

Математична модель вихідної характеристики тензочутливого елемента, котра враховує зміну довжини каналу при напруженні (деформації), визначається виразом $dV = I_D dR_K$ при граничних умовах $V = 0, x = 0$ і $V = V_D, x = L$ [141 - 147]:

$$I_D = \frac{Z \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{SiO}_2} \mu_n}{\left(1 + \frac{X}{C}\right) (1 + \pi_l X) L_0 d} \left| \frac{V_D^2 + V_D}{2} \left(\frac{2kT}{e} \ln \left(\frac{N_D}{\sqrt{N_C N_V} \exp \left[\frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right]} \right) - V_G \right) \right|. \quad (3.6)$$

3. Визначаємо максимальну робочу температуру T_{\max} , попередньо визначивши температуру пробою $T_{\text{пр}}$.
4. Оцінюємо рівень вихідного сигналу з вибраними параметрами. Якщо рівень вихідного сигналу відповідає умовам завдання, тоді переходимо до оцінювання лінійності. Якщо рівень вихідного сигналу не відповідає умовам завдання, тоді необхідно підвищувати параметр потенціалу на ізолюваному електроді V_G з найменшим приростом.

3.5. Розробка модуля вимірювання напружено – деформованого стану конструкцій

Спосіб передачі даних від первинних датчиків до вторинних приладів шляхом використання аналогових інтерфейсів з дротовими лініями зв'язку в дистанційних вимірювальних системах на даний момент досить популярним, не дивлячись на велику кількість розвинутих і більш технологічних провідних та безпроводних цифрових інтерфейсів. Це підтверджується тим, що науковці та виробники мікросхем продовжують пропонувати нові інтегральні рішення для аналогової передачі інформації [51, 67, 123 - 127].

Такі рішення пояснюються рядом причин. У системах промислової автоматики існує велика кількість розроблених і виготовлених багато років назад пристроїв, що використовують аналогові канали передачі даних. Це можуть бути датчики, виконавчі пристрої, пристрої реєстрації тощо. Заміна цього обладнання йде повільно і вимагає дуже великих капіталовкладень. Крім того, переведення якого-небудь виробництва цілком на цифрові мережі означає одномоментну заміну практично всього обладнання та інформаційних кабельних мереж. Така масштабна реконструкція вимагає не тільки величезних коштів, але і зупинки виробничого процесу, що в багатьох випадках неприпустимо. Тому при створенні або модернізації автоматичних систем управління доводиться використовувати аналогові канали передачі даних для отримання інформації від датчиків і передачі управління на виконавчі механізми [51, 67].

Здійснений нами аналіз вітчизняних та закордонних публікацій показав, що на сьогоднішній день оптимізація аналогових інтерфейсів спрямована на зменшення не лише інструментальних похибок, але й на усунення методичних похибок, зокрема похибок накладення спектрів та похибок відновлення сигналу [51, 67, 122, 128 - 129].

Резистивні тензодатчики перетворюють у зміну свого опору деформацію, яка, практично, є рівною деформації об'єкта у місці закріплення датчика. Ці датчики є пасивними і для їх збудження (ініціалізації) використовують джерело живлення, підключене до вимірювального ланцюга, який містить тензодатчики [51, 67, 121 - 125].

Завданням моделювання аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків є підвищення завадозахищеності та точності вимірювань аналого-цифрового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань [51, 67].

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків відноситься до області

вимірювальної техніки, а саме - до електричних вимірювань неелектричних величин, у даному разі механічних [51, 67].

Відомий аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків [121], який містить у своєму складі послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг з резистивними тензодатчиками, вимірювальний підсилювач та аналоговий перетворювач логотричного типу. Джерелом живлення є джерело постійної напруги, гальванічного ізольоване від землі. Вимірювальний ланцюг виконаний як неврівноважена мостова схема з двома тензорезисторами та двома підстроювальними резисторами у своїх плечах [51, 67].

Сигнал з виходу вимірювального ланцюга передається на вхід вимірювального підсилювача за допомогою дротових ліній зв'язку. Несиметрія цих ліній з урахуванням значного вхідного опору вимірювального підсилювача призводить до того, що виникає різниця потенціалів (напруга завади) яка може бути порівняною з корисним сигналом, який може бути спотворений навіть слабкою завадою. Ще одним недоліком даного інтерфейсу є те, що даною схемою не враховується зміна опору тензодатчиків у процесі експлуатації, що, в свою чергу, знижує точність вимірювання при автокорекції [51, 67].

Аналогово - цифровий інтерфейс для дистанційних вимірювань [122] містить послідовно з'єднаний вимірювальний ланцюг 1, у який включено тензодатчик 7, вхід якого зв'язаний з джерелом живлення 5, вимірювальний підсилювач 2, виконаний на операційних підсилювачах 13-15, включених за двокаскадною схемою, та аналого- цифровий перетворювач логотричного типу 3, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку 23-27 вимірювального ланцюга 1 є дротовими. Джерело живлення 5 виконано у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор 4, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера 6, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, вимірювальний ланцюг 1 виконаний у вигляді трьох

резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду включено за схемою інвертора струму (рис. 3.6) [51, 67].

Недоліком даної конструкції є наявність похибок, що виникають через корельовані шуми операційних підсилювачів, та наведення на «загальний» опір в «земляному» контурі [51, 67].

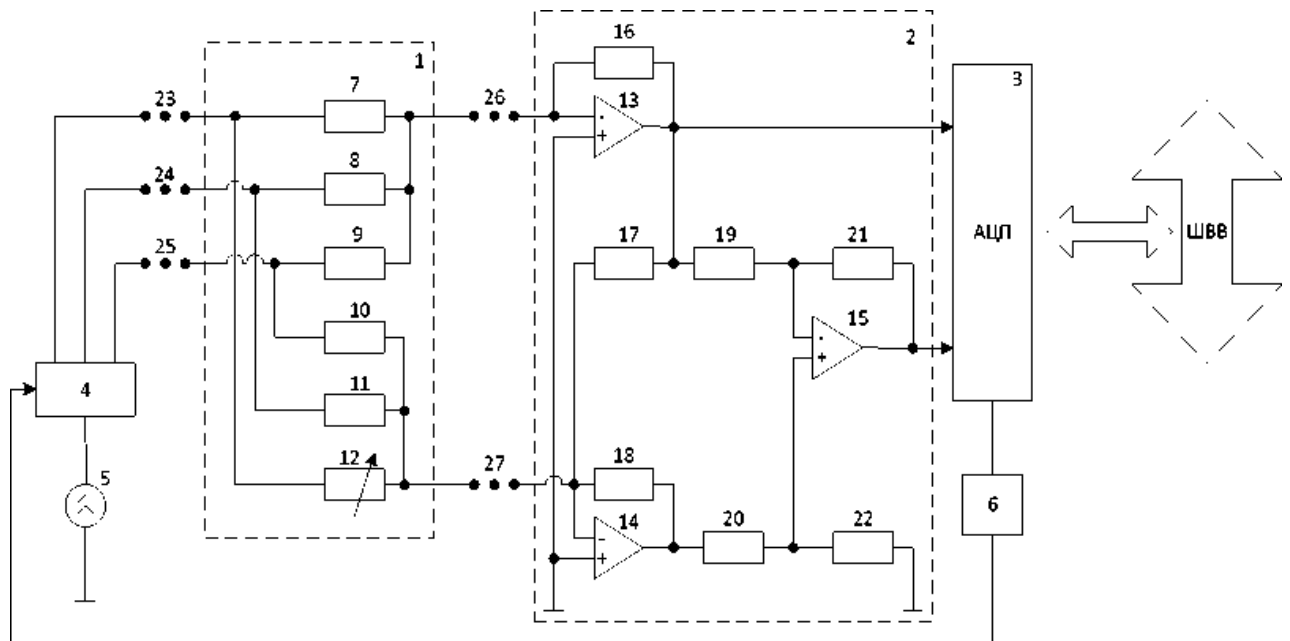


Рис. 3.6 - Функціональна схема аналогового інтерфейсу:

1 - вимірювальний ланцюг; 2 - вимірювальний підсилювач; 3 - аналого-цифровий перетворювач логотричного типу; 4 - аналоговий мультиплексор; 5 - джерело постійного струму (без гальванічної розв'язки); 6 - мікроконтролер; 7 - резистивний тензодатчик; 8 - 11 - зразкові резистори; 12 - підстроювальний резистор; 13 - 15 - операційні підсилювачі; 16 - 22 - резистори; 23 - 27 - дрові лінії зв'язку

Поставлене завдання вирішується тим, що аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань на базі резистивного тензодатчика містить послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, та вхід якого з'єднаний з джерелом живлення через аналоговий демультиплексор, а виходи вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор підключено до входів вимірювального підсилювача з диференціально – струмовими входами та першим та другим виходами,

виконаний на операційних підсилювачах, та двоканальний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими, згідно з пропозицією джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий демультиплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, перший вхід якого під'єднано до першого виходу вимірювального підсилювача, а другий вихід якого під'єднано до другого входу АЦП, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду виконано за схемою інвертора струму [51, 67].

На рис. 3.7 показано схему запропонованого аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків [51, 67].

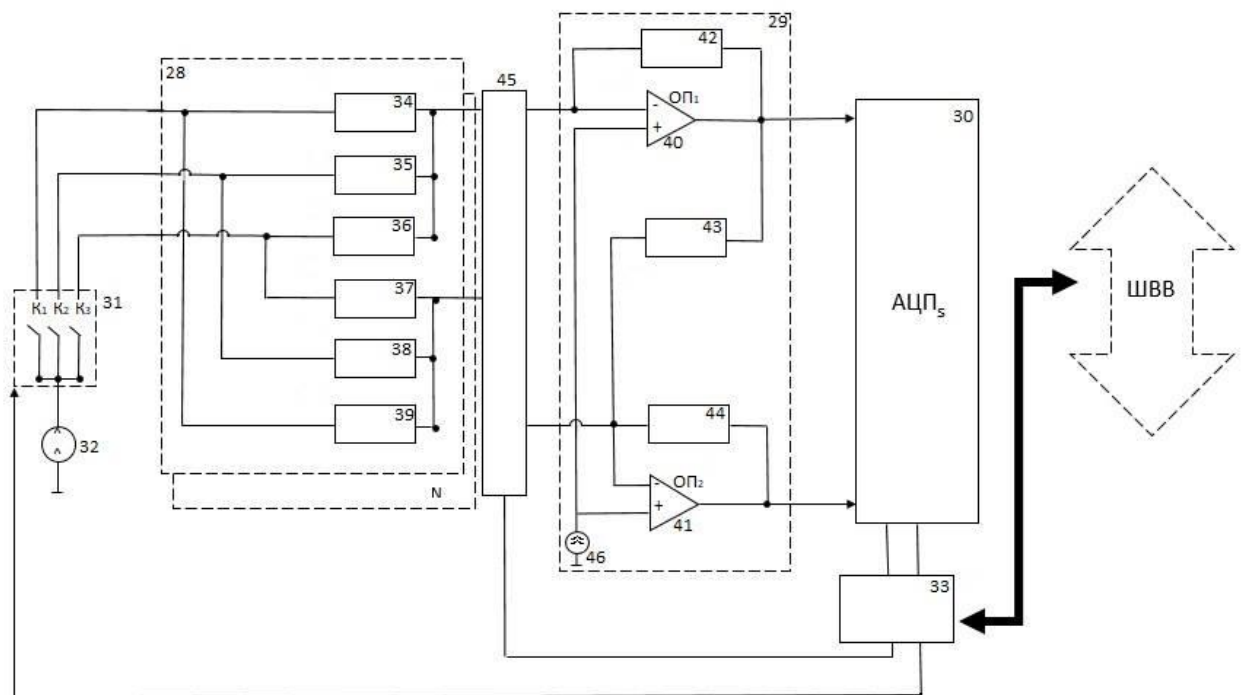


Рис. 3.7 - Схема електрична, функціональна аналогового інтерфейсу

для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків:

28- вимірювальний ланцюг N-ї кількості; 29 - вимірювальний підсилювач з диференціально – струмовими входами; 30 - двоканалний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою; 31 - аналоговий демультимплексор з третім станом; 32 - джерело постійного струму (без гальванічної розв'язки); 33 - мікроконтролер; 34 - резистивний тензодатчик; 35 - 38 - зразкові резистори; 39 - підстроювальний резистор; 40 - 41 - операційні підсилювачі з диференціально – струмовими входами; 42 - 44 - резистори; 45 – аналоговий диференціальний мультиплексор; 46 – ЕРС, що є еквівалентом корельованих шумів та напруги в «земляному» контурі через «спільний» опір

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків працює наступним чином. Цикл вимірювання складається з чотирьох робочих тактів. В першому такті демультимплексор 31 знаходиться в «третьому стані», тобто коли всі ключі даного демультимплексора закриті і струм ініціалізації I_0 не потрапляє у вимірювальний ланцюг 28. При цьому результати вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ запам'ятовуються в пам'яті комп'ютера під назвою «U₁₁» та «U₁₂» [51, 67].

В другому такті ключ K₁ демультимплексора 31 замикається, ключі K₂ та K₃ розімкнені. В цьому випадку запам'ятовуються результати вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ під назвою : «U₂₁» та «U₂₂» [51, 67].

В третьому такті замикається ключ K₂ до демультимплексора 31, а ключі K₁ та K₃ – розімкнені. В такому випадку результати вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ запам'ятовуються під назвою : «U₃₁» та «U₃₂» [51, 67].

У четвертому такті ключі K₁ та K₂ розімкнені, а ключ K₃- замкнений. В цьому випадку запам'ятовуються результати вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ під назвою : «U₄₁» та «U₄₂» [51, 67].

Скорегований результат вимірювання обчислюватиметься за формулою [51, 52, 67]:

$$\delta = \delta_{\text{ном}} \cdot \left[\frac{U_{22}-U_{12}}{U_{21}-U_{11}} \frac{U_{42}-U_{12}}{U_{41}-U_{11}} \right], \quad (3.4)$$

При цьому, на відміну від класичного методу зразкових мір [123], даний метод відрізняється «безрозривністю» вимірювальної ланки, що дає змогу скомпенсувати більшу кількість впливових факторів, зокрема корельованих шумів операційних підсилювачів та шумів, зумовлених наявністю загального контуру заземлення, опору аналогових комутаторів. Наприклад, у [124] наводиться корекція похибок аналогового інтерфейсу для роботи з тензодатчиками, суттєвим недоліком якої є істотний вплив опору аналогових комутаторів, що зменшує ефективних придушення систематичних складових похибок. Крім цього, до недоліків таких схем (що використовують мостові підсилювачі) відноситься необхідність додаткового каскаду для обмеження смуги частот каналу [51, 52, 67].

Для того, щоб перевірити ефективність запропонованого способу щодо корекції впливу різноманітних впливових факторів, отримуємо функцію перетворення для всього вимірювального каналу, скориставшись лінійною функцією перетворення тензодатчика і змодулювавши вплив вимірювальної величини певними значеннями опорів тензодатчика [51, 52, 67, 126 - 129].

Для перевірки цього було створено модель, що представлено на рис. 3.8, в якій використані параметри реальних компонентів, а саме 8-канального аналогового диференціального мультиплексора (тип MAX 307 фірми MAXIM) та операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 загального користування типу MA741 [51, 52, 67, 125].

Вихідний опір джерела струму ініціалізації було вибрано за параметрами джерела струму в інтегральному виконанні типу REF200 фірми Burr- Brown 10 МОм у найгіршому випадку [51, 52, 67].

На рис. 3.8 наведено електричну схему вимірювального каналу в програмному середовищі Elektronik Workbench [51, 52, 67], де:

I_1 – джерело струму ініціалізації ($I_0 = 1 \text{ mA}$);

R_1 – резистор, який моделює вихідний опір джерела струму I_1 ;

K_1, K_2, K_3 – аналоговий демультимплексор, який переключає струм ініціалізації джерела струму I_1 між зразковими та вимірювальними резистивними подільниками струму;

R_2, R_3 – подільник струму, який утворюється резистором R_2 , що змінюється в залежності від вимірюваного тиску в межах від 7500 Ом до 7537,5 Ом, та зразковим резистором R_3 , який дорівнює початковому значенню опору тензодатчика, тобто 7500 Ом;

R_4, R_5 – подільник струму, який утворюється резистором R_4 , що дорівнює максимальному опору тензодатчика ($R_4 = 7537,5$ Ом), та резистором R_5 , що дорівнює початковому значенню опору тензодатчика ($R_5 = 7500$ Ом);

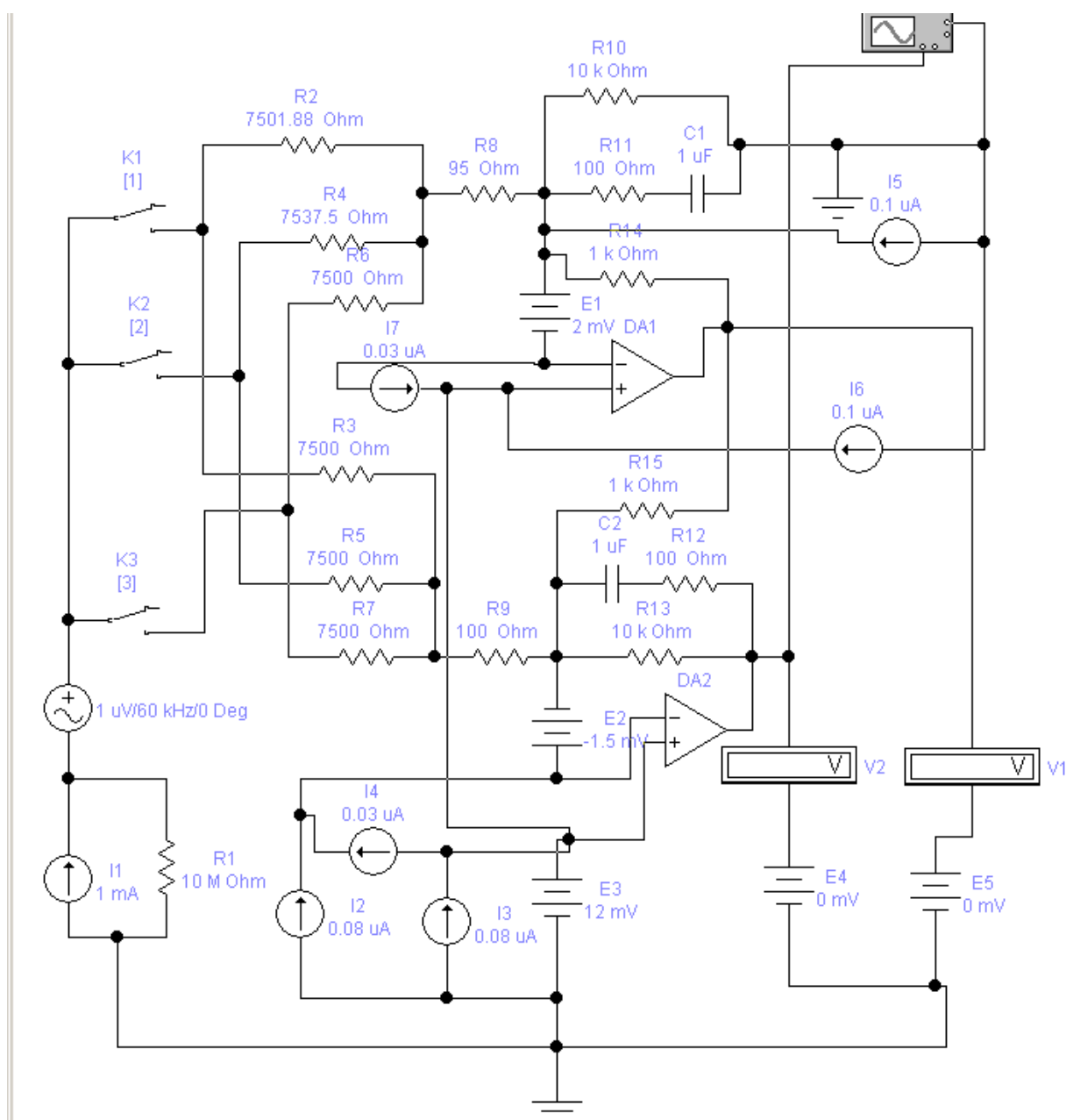


Рис. 3.8 - Електрична схема вимірювального каналу в програмному середовищі Electronic Workbench

R_6, R_7 – подільник струму, який імітує нульовий розбаланс тензомоста ($R_6 = R_7 = 7500 \text{ Ом}$);

R_8, R_9 – опори паралельних каналів мультиплексора у замкненому стані ключа диференціального аналогового мультиплексора. Для мультиплексора типу MAX 307 $R_8 = 95 \text{ Ом}$, $R_9 = 100 \text{ Ом}$;

R_{10}, R_{11}, C_1 – ланцюг, що корегує корельовану частину шумів на вході операційних підсилювачів DA_1 та DA_2 , який ідентичний ланцюгу

негативного зворотнього зв'язку (R_{12} , R_{13} , C_2) інвертуючого суматора на операційному підсилювачі ДА₂, що також виконує роль обмежувача смуги частот корисного сигналу на рівні 16 Гц;

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ},$$

$$R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{13} = 10 \text{ кОм};$$

R_{14} , R_{15} – резистори інвертора струму, виконаного на операційному підсилювачі ДА₁; $R_{14} = R_{15} = 1 \text{ кОм}$;

Вимірювальний підсилювач з диференціально – струмовими входами складається з інвертора струму (ДА₁, R_{14} , R_{15}) та інвертуючого суматора (ДА₂, R_{13} , C_2 , R_{12});

E_1 – напруга зміщення нуля операційного підсилювача ДА₁. $E_1 = +2 \text{ мВ}$ згідно технічних характеристик МА 741;

E_2 – напруга зміщення нуля операційного підсилювача ДА₂. $E_1 = +1,5 \text{ мВ}$ як найгірше значення неідентичності напруги зміщення E_1 (порядка 20%);

E_3 – моделювання «синфазної» напруги по земляному контуру. Приймаємо $E_3 = 12 \text{ мВ}$;

I_2 , I_3 – струми зміщення нуля операційного підсилювача ДА₂.

$I_2 = I_3 = 80 \text{ нА}$ згідно технічних характеристик МА 741;

I_4 – різниця струмів зміщення нуля операційного підсилювача ДА₂.

$I_4 = -30 \text{ нА}$ згідно технічних характеристик МА 741;

I_5 , I_6 – струми зміщення нуля операційного підсилювача ДА₁.

$I_5 = I_6 = 100 \text{ нА}$ згідно технічних характеристик МА 741;

I_7 – різниця струмів зміщення нуля операційного підсилювача ДА₁. $I_7 = +30 \text{ нА}$ як найгірший розбаланс по струмах зміщення. При таких значеннях адитивних похибок операційних підсилювачів (максимально можливих) співвідношення С/Ш на виході вимірювального підсилювача буде складати близько 10 децибел. Це свідчить про те, що завада має вагомий внесок;

V_2 – вольтметр на виході вимірювального підсилювача;

V_1 – вольтметр на виході операційного підсилювача ДА₁;

E_4 , E_5 – джерела напруг для впровадження диференційного методу вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів відповідно $ДА_1$ та $ДА_2$, що дає змогу зменшити вплив похибки квантування.

Інші параметри операційних підсилювачів $ДА_1$ та $ДА_2$ було взято з технічних характеристик МА 741 по типовим значенням [51, 52, 67].

В таблиці 3.1 наведено результати моделювання вимірювального каналу для 21 значення опору резистивного напівпровідникового тензодатчика високотемпературного на основі карбіду кремнію при $\kappa=5$ і початковому опорі датчика $R_{d0}=7,5\text{кОм}$.

Параметри ОП1 вибрані наступними [52]:

- струм зміщення 100 нА;
- різниця струмів зміщення +30 нА;
- напруга зміщення нуля +2 мВ;
- вхідний опір 1 МОм.

Параметри ОП2 вибрані наступними:

- струм зміщення 80 нА;
- різниця струмів зміщення -30 нА;
- напруга зміщення нуля +1,5 мВ;
- вхідний опір 1 МОм.

Використовуючи програмне середовище NUMERY, було визначено регресійне рівняння функції перетворення вимірювального каналу, що дозволило визначити систематичні та випадкові складові похибки вимірювального каналу без врахування похибок датчика [52].

Таблиця 3.1

Результати моделювання вимірювального каналу

R_d , [Ом]	$\Delta\delta$	δ	U11, мВ	U12, мкВ	U21, мВ	U22, мВ	U31, мВ	U32, мВ	U41, мВ	U42, мВ
7500,000	0	0	13,2	0,2	-486,7	-1,928	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7501,875	0,025	0,024686	13,2	0,2	-486,6	-3,114	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7503,750	0,050	0,024816	13,2	0,2	-485,6	-3,114	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928

7505,625	0,075	0,075022	13,2	0,2	-486,5	-5,532	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7507,500	0,100	0,075022	13,2	0,2	-486,5	-5,532	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7509,375	0,125	0,125025	13,2	0,2	-486,4	-7,933	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7511,250	0,150	0,150042	13,2	0,2	-486,3	-9,133	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7513,125	0,175	0,174964	13,2	0,2	-486,3	-10,33	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7515,000	0,200	0,199996	13,2	0,2	-486,2	-11,53	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7516,875	0,225	0,224985	13,2	0,2	-486,2	-12,73	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7518,750	0,250	0,250033	13,2	0,2	-486,1	-13,93	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7520,625	0,275	0,27509	13,2	0,2	-486,0	-15,13	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7522,500	0,300	0,30009	13,2	0,2	-486,0	-16,33	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7524,375	0,325	0,324954	13,2	0,2	-485,9	-17,52	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7526,250	0,350	0,349958	13,2	0,2	-485,9	-18,72	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7528,125	0,375	0,375045	13,2	0,2	-485,8	-19,92	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7530,000	0,400	0,400143	13,2	0,2	-485,7	-21,12	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7531,875	0,425	0,424949	13,2	0,2	-485,7	-22,31	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7533,750	0,450	0,450062	13,2	0,2	-485,6	-23,51	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7535,625	0,475	0,475081	13,2	0,2	-485,6	-24,71	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7537,500	0,500	0,501877	13,2	0,2	-485,5	-25,99	-485,5	-25,9	-486,7	-1,927

Тоді регресійне рівняння функції перетворення вимірювального каналу першого порядку буде мати наступний вигляд [52]:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \\ a_0 = -6,95 \cdot 10^{-6} \\ a_1 = 1,000163 \\ a_2 = 0,00007 \\ \sum \delta_{\text{нев}}^2 = 9,48 \cdot 10^{-8} \end{array} \right. , \quad (3.5)$$

де y — вихідний сигнал на виході вимірювального підсилювача; a_0, a_1, a_2 — коефіцієнти регресії; x — поточне значення вхідної вимірювальної величини; $\sum \delta_{\text{нев}}^2$ — сума квадратів нев'язок між поточним значенням вхідної величини та її математичним очікуванням.

У відповідності до вимог [110 - 112], необхідно представити клас точності згідно двочленної формули [52]:

$$\delta_B = \pm \left[C + d \left(\frac{x_H}{x} - 1 \right) \right] \quad (3.6)$$

де δ_B – відносна похибка вимірювання; C, d – коефіцієнти, що визначаються за формулами:

$$C = \gamma_\Sigma + d, \quad (3.7)$$

γ_Σ – максимальне значення підсумкової мультиплікативної похибки;

$$\gamma_\Sigma = \gamma + \gamma_{\text{нел.мах}}, \quad)$$

де γ – мультиплікативна похибка, що в свою чергу визначається за формулою:

$$\gamma = \left(\frac{a_1}{a_1^*} - 1 \right) \cdot 100\% \approx 0,0163\%, \quad (3.9)$$

де a_1^* – ідеальне значення коефіцієнту a_1 ;

$$a_1^* = 1$$

$\gamma_{\text{нел.мах}}$ – максимальне значення похибки не лінійності (інтегральна не лінійність):

$$\gamma_{\text{нел.мах}} \approx \frac{a_2}{a_1} \cdot x_H \approx 0,007\%, \quad (3.10)$$

де x_H - максимальне значення вхідної величини; $x_H = 0,5\%$.

Тоді, підставляючи (3.9) та (3.10) в (3.8), отримаємо:

$$\gamma_{\Sigma} = 0,0163 + 0,007 \approx 0,025\%$$

Сумарна приведена адитивна похибка d буде [52]:

$$d = \frac{a_0 - a^*}{x_H} + 3\sigma_{\text{пр}}, \quad (3.11)$$

де a_0^* - ідеальне значення коефіцієнту a_0 ;

$$a_0^* = 0$$

$\sigma_{\text{пр}}$ – приведені значення середньоквадратичної випадкової складової похибки, що визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_{\text{нев}}^2}{n-1}}, \quad (3.12)$$

n - кількість вимірювань.

Тоді:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{9,48 \cdot 10^{-8}}{21-1}} = 7 \cdot 10^{-5}.$$

Підставивши відповідні значення складових у формулу (3.11), отримаємо [52]:

$$d = \frac{a_0 - a^* + 3\sigma_{\text{пр}}}{\delta_{\text{ном}}} = \frac{-6,95 \cdot 10^{-6} + 3(7 \cdot 10^{-5})}{0,5} \cdot 100\% = 0,05\%.$$

Якщо нехтувати величинами другого порядку малості, то, застосувавши формулу (3.7), сумарна мультиплікативна похибка буде дорівнювати [52]:

$$C = 0,025 + 0,05 = 0,075\% .$$

Таким чином метрологічні характеристики оцінені класом точності, який буде мати значення: $0,075/0,05$, що на порядок перевищує точність існуючих аналогів при інших рівних умовах [52].

Графік залежності відносної похибки вимірювання від значення вхідної величини наведено на рис. 3.9 [52].

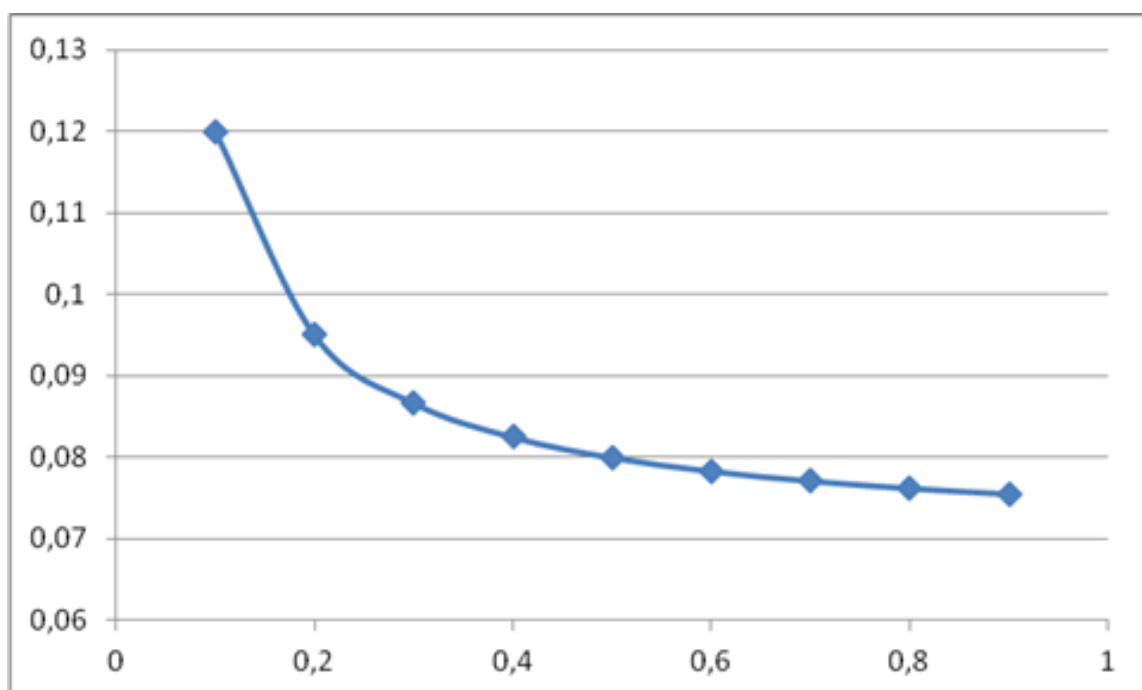


Рис. 3.9 - Графік залежності відносної похибки вимірювання від значення вхідної величини

З наведеного аналізу результатів моделювання з'ясовано, що домінувати буде випадкова адитивна складова похибки. Оскільки при моделюванні єдиною випадковою складовою похибки є похибка квантування, то використання диференціального методу вимірювання вихідної напруги суттєво покращить метрологічні характеристики [52].

Дана робота зорієнтована на пошук можливостей щодо підвищення точності дистанційних вимірювань та завадозахищеності аналогових інтерфейсів централізованого типу за допомогою резистивних тензодатчиків

шляхом впровадження нової структурної схеми та способу корекції похибок, що дає змогу зменшити рівень похибок по відношенню до відомих аналогів в десятки разів [52].

Висновки по розділу 3

1. Дістали подальший розвиток теоретичні основи аналізу приладової системи на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено – деформований стан складних конструкцій, що дають можливість визначити коригуючі параметри при використанні поліноміальних залежностей від п'ятого до дев'ятого порядку.
2. Дістали подальший розвиток теоретичні основи розробки приладових систем для вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій, у тому числі удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану та розроблено методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію, та забезпечує підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.
3. Розроблено структурну схему приладової системи, що містить первинні датчики механічних величин - сенсори, які встановлюються на об'єкті вимірювання, наприклад датчики руху, тиску, температури, деформації тощо, пристрої посилення і нормалізації сигналів датчиків, аналоговий мультиплексор, який використовується для почергового підключення сигналів датчиків до аналого-цифрових перетворювачів через пристрій вибірки та зберігання.
4. Удосконалено модель аналогового інтерфейсу для дистанційних

вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцією похибки під впливом різноманітних дестабілізуючих факторів, зорієнтований на дистанційне вимірювання параметрів напружено – деформованого стану за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків з підвищеними метрологічними та техніко – економічними характеристиками, структура яких включає вимірювальний підсилювач з диференційно- струмовими входами, що забезпечує підвищення коефіцієнту послаблення синфазних завад.

5. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціально – струмовими входами для роботи з одноелементним тензодатчиком, де один із подільників утворений резистивним тензодатчиком, а сам вимірювальний підсилювач включає операційний підсилювач першого каскаду, виконаний за схемою інвертора струму, що дає можливість зменшити інструментальні похибки, зумовлені неідеальністю операційних підсилювачів, ліній зв'язку та аналогових комутаторів.

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ

МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАННЯ

ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЕФОРМАЦІЇ

В сучасних умовах виробництва та експлуатації складних технічних конструкцій найбільш поширеними засобами вимірювання їх напружено – деформованого стану є тензодатчики та тензорезистори.

В дослідженнях було розглянуто приладову систему вимірювання, у якій тензорезистори підключаються за мостовою схемою, що забезпечує усунення систематичних помилок вимірювання і компенсацію температурних деформацій.

Для корекції похибок датчиків що виникають внаслідок впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, зокрема температури, застосовували методи автоматичної корекції на основі методів допоміжних вимірювань, які регламентуються міжнародним стандартом IEEE 1451.02, що передбачає використання множини функцій перетворень, декількох еталонних значень вхідної величини під впливом різних значень дестабілізуючого фактору (TEDS).

За допомогою пакету NUMERY отримуємо коефіцієнти лінійної регресії підсумкової похибки від температури

За результатами досліджень, що висвітлено у даному розділі, автором були опубліковані роботи [51-53, 55, 57-59, 60, 63, 66, 70-72].

4.1. Оптимізація вимірювальних засобів

напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчиків

У зв'язку із сучасною хвилею інтелектуалізації засобів вимірювання набувають все більшої популярності цифрові методи корекції не тільки первинних вимірювальних перетворювачів, але і вторинних, тобто датчиків. Оскільки функція перетворення вторинних вимірювальних перетворювачів є лінійною, то для автоматичної корекції систематичних складових похибок таких перетворювачів використовується метод зразкових мір по двом точкам [53, 59, 60].

Найбільш поширеним засобом вимірювання напружено-деформованого стану складних конструкцій, що мають широке застосування у відповідальних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, авіації та ракетобудуванні, інших галузях промисловості на сьогоднішній день є тензодатчики та тензорезистори. Як правило, тензорезистори підключаються до приладової системи вимірювання за мостовою схемою, забезпечує усунення систематичних помилок вимірювання і компенсацію температурних деформацій. Переваги та недоліки їхнього застосування для зазначеної мети досить добре відомі [53, 59, 60].

Для корекції похибок датчиків, функція перетворення яких, як правило, є нелінійною та зазнає впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, основним з яких є температура, використовуються на сьогоднішній день методи автоматичної корекції на основі методів допоміжних вимірювань, які регламентуються міжнародним стандартом IEEE 1451.02, що передбачає використання множини функцій перетворень, декількох еталонних значень вхідної величини під впливом різних значень дестабілізуючого фактору (TEDS). Ці дані використовуються для отримання скорегованого результату шляхом вирішення систем нелінійних рівнянь [53, 59, 60].

В [57], наприклад, описано метод цифрової компенсації, що забезпечує більш значне зниження (на порядок) похибок вимірювальних перетворювачів в порівнянні з методом аналогової компенсації. Особливості і технічні показники даного методу розглядаються на прикладі вимірювального перетворювача тиску з фольговими тензорезисторами. Такий вимірювальний перетворювач складається із круглої металевої мембрани, в якій на одній із поверхонь наносяться чотири однакових фольгових тензорезистори, що з'єднані за мостовою схемою і розміщуються таким чином, що при деформації мембрани під дією тиску два тензорезистори працюють на розтяг, а два інших – на стиск. В якості матеріалу фольгового тензорезистора взято сплав з мінімальним температурним коефіцієнтом опору [53, 59, 60].

На поверхні мембрани також улаштовуються додаткові компенсаційні резистори. З підвищенням температури жорсткість мембрани зменшується внаслідок температурних змін модуля пружності матеріалу мембрани, що призводить до збільшення чутливості вимірювального перетворювача [53, 59, 60].

Даний метод є універсальним, дозволяє скорегувати не лише похибки нелінійності вимірювального каналу та додаткові похибки, але й похибки, пов'язані з впливом завад загального виду через опір заземлення, який спонукає зв'язок між вимірювальними каналами основного та дестабілізуючого фактору [53, 59, 60].

До недоліків цього методу можна віднести значний об'єм обчислень, який різко зростає при збільшенні порядку апроксимуючих поліномів [53, 59, 60, 63, 72].

Основними дестабілізуючими факторами, які обмежують точність вимірювання з використанням тензодатчика, є [53, 59, 60]:

- Випадкові процеси (шуми, завади тощо);
- Часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок старіння та фізичної деградації;
- Впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів (температура, вологість тощо).

Що стосується систематичних складових, то найбільш вагомими при статистичних вимірюваннях є похибки нелінійності та температурна складова похибки [53, 59, 60].

При статичних вимірюваннях основна вимога зводиться до отримання лінійної залежності між вхідною і вихідною величинами перетворювача [53, 59, 60].

Залежність «вхід – вихід» вимірювальних приладів без врахування таких факторів, як гістерезис, сповзання нуля тощо описується у вигляді рівняння [53, 59, 60]:

$$Y_{out} = (a_0 + a_1 x_{in} a_2 x_{in}^2 + \dots + a_n x_{in}^n) x_{in}, \quad (4.1)$$

де x_{in} – вхідна величина; Y_{out} – вихідна величина; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – градуювальні коефіцієнти.

Вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика в багатьох практичних задачах є не менш важливим за вплив навантаженням і є важливим фактором, що здатний змінити опір тензорезистора. При зміні температури навколишнього середовища виникає чотири ефекта, що здатні змінити функціональні характеристики датчика[53, 55, 59, 60]:

1. Зміна тензочутливості металевого сплаву S_A ;
2. Подовження або скорочення решітки датчика ($\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$);
3. Подовження або скорочення зразка ($\frac{\Delta L}{L} = \beta \Delta T$);
4. Зміна опору датчика ($\frac{\Delta R}{R} = \gamma \Delta T$).

Тензочутливість S_A одного з найбільш широко вживаних сплавів – константану є лінійною функцією температури [55], де для константана $\Delta S_A / \Delta T$ складає 0,00735 % на 1°C . У зв'язку з тим, що зміни S_A досить малі (менше 1% для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$), то при звичайному аналізі напружень вони не враховуються. Однак при дослідженні температурних напружень, коли систематично спостерігаються перепади температури $\sim 10^2^\circ\text{C}$, необхідно враховувати зміни S_A . При цьому найбільш суттєвими є другий, третій та четвертий ефекти, що викликають зміну опору датчика з температурою $(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T}$ відповідно до залежності[53, 59, 60]:

$$(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T} = (\beta - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T, \quad (4.2)$$

де α - коефіцієнт теплового розширення матеріалу датчика; β - коефіцієнт теплового розширення матеріалу зразка; $S_g \Delta$ - тензочутливість датчика; γ - температурний коефіцієнт опору матеріалу датчика.

Відмінність в тепловому розширенні матеріалів датчика і зразка призводить до механічних деформацій решітки датчика $\varepsilon_T = (\beta - \alpha)\Delta T$, що викликані впливом на зразок не силових факторів, а температурних. Датчик реагує на деформацію ε_T так само, як і на деформацію зразка ε , зумовленої навантаженням, що породжує компоненту вихідного сигналу, що відповідає температурі [53, 55, 59, 60].

При рівності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів датчика і зразка, наявна деформація визначається другим членом рівняння (4.2), оскільки перший член дорівнюватиме нулю. Температурна компенсація датчика досягається лише за умови, коли обидва члени рівняння (4.2) або рівні нулю, або взаємно знищуються [53, 59, 60].

Величини α і γ є досить чутливими до вмісту сплаву та режиму його холодної обробки в процесі прокатки фольги. Загальноприйнятим етапом виробничого циклу виготовлення тензодатчиків є вибіркове вимірювання температурних характеристик декількох датчиків із кожного рулону фольги, що використовується при виготовленні решіток. Існування варіацій у величинах α і γ від плавлення до плавлення та від рулону до рулону дозволяє підбирати датчики, що виготовлені на базі константану, які застосовуються до різноманітних конструкційних матеріалів [53, 59, 60].

Матеріали для тензорешіток повинні відповідати таким основним вимогам [53, 55, 59, 60]:

- мати високий питомий опір, що дозволяє виготовляти малобазні тензорезистори з досить великим опором;
- володіти високою і стабільною чутливістю до деформацій;
- зміни опору, викликані деформацією, повинні підпорядковуватися лінійному закону в достатньо широкому діапазоні;

- бути нечутливим до впливу температури, тобто температурний коефіцієнт опору повинен бути близьким до нуля;
- термоЕРС в парі з міддю повинна бути якомога менше, що дуже важливо при живленні тензорезисторів постійним струмом;
- температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу проволочки і матеріалу досліджуваної деталі, на яку наклеюється тензорезистор, повинні бути рівними або незначно відрізнятися, в іншому випадку зміни температури будуть викликати уявну деформацію і, отже, створювати похибки при вимірах;
- не мати гістерезису;
- володіти технологічністю, що дозволяє виготовляти фольгу мікронних розмірів;
- мати високе відношення межі пропорційності до модуля пружності;
- сплави, що застосовуються для виготовлення високотемпературних тензорезисторів, повинні добре протистояти окислювальному впливу зовнішнього середовища.

Що стосується константану, то на даний час більшість тензорезисторів виготовляється з даного сплаву в силу наступних його основних переваг [53, 55, 59, 66, 70]:

- сталість коефіцієнта тензочутливості в досить широкому діапазоні деформацій (до 8%);
- у відпаленому стані константан може бути використаний при вимірюванні деформацій до 20%; проте в цьому випадку у константана проявляється зміна початкового опору, що свідчить про систематичну зміну опору при кожному циклі навантаження;
- відсутність істотних змін при переході від пружного деформування до пластичного;
- константан володіє високим питомим опором ($\rho = 0,49 \text{ мкОм / м}$);
- константан володіє високою температурною стабільністю;

- можливість створення температурно-компенсованих тензодатчиків шляхом узгодження коефіцієнта температурного розширення датчика з аналогічним параметром технічного матеріалу (в діапазоні від 0 до $100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

Зазвичай тензорезистори виготовляються з м'якого відпаленого константана. Основними його недоліками є [53, 55, 59, 66, 70]:

- низький коефіцієнт тензочутливості (близько 2,1);
- значна термоЕРС в парі з міддю (близько 47 мкВ/°C). Правда, останній недолік позначається лише при живленні тензомоста постійним струмом при наявності різниці температур між выводами.

Слід зазначити, що датчики із вибірових плавень не є повністю компенсованими в широкому діапазоні температур через присутність нелінійних членів рівняння (4.2). Типові датчики із вибірових плавень виявляють присутність похибки, яка змінюється зі зміною температури [53, 55, 59].

Дослідженнями [55] встановлено, що похибка, викликана зміною температури в декілька градусів в межах 24°C, є досить малою (менше 0,5 мкм/м°C). Однак при суттєвих змінах температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. З цією метою необхідно виміряти температуру поблизу датчика і використати залежність вимірювальної похибки від температури [53, 59].

Нами було досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки ($\pm 10\%$) на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами [53, 55, 59].

В табл. 1.2 (розділ 1) наведено значення похибки в температурному режимі від -75°C до +250°C для константана та карми.

За допомогою пакету NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліфному. Отримано наступні дані (табл.4.1 та 4.2).

Таблиця 4.1

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів для константана

Поліноміальні коефіцієнти	Порядок поліному					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a₀	-16,4277781	-15,0129174	-6,3200432	-14,2274504	-13,276337	-16,29822
a₁	1,5921428	1,8995044	2,0483683	2,3282625	1,7345866	1,5277609
a₂	-0,046261	-0,048572	-0,0579458	-0,0484233	-0,0467915	-0,0378965
a₃	0,0002543	0,0002015	0,000209	0,0000271	0,0003704	0,0004673
a₄	-2,6037*10 ⁻⁷	2,6784*10 ⁻⁷	1,5*10 ⁻⁶	8,25445*10 ⁻⁷	-2,07862*10 ⁻⁶	-6,14724*10 ⁻⁶
a₅		-1,20735*10 ⁻⁹	-1,00141*10 ⁻⁸	1,39213*10 ⁻⁸	-1,59733*10 ⁻⁸	-3,43268*10 ⁻⁹
a₆			1,67747*10 ⁻¹¹	-1,10787*10 ⁻¹⁰	3,56472*10 ⁻¹⁰	7,43916*10 ⁻¹⁰
a₇				2,08264*10 ⁻¹³	-1,80145*10 ⁻¹²	-5,748*10 ⁻¹²
a₈					2,87103*10 ⁻¹⁵	1,70738*10 ⁻¹⁴
a₉						-1,80353*10 ⁻¹⁷
Σ θ²	2827,9491538	2227,5429176	1498,0882269	849,1320204	210,7311456	97,2128335
σ_[%]	0,75	0,65	0,5	0,4	0,2	0,14

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках) $\sigma_{[%]}$ визначатиметься за формулою [53, 55, 59]:

$$\sigma_{[%]} = \sqrt{\frac{\sum \theta^2}{n-1}} / \delta_{\text{nom}} \cdot 100\% , \quad (4.3)$$

де θ^2 - сума квадратів нев'язок; n - кількість результатів вимірювань; δ_{nom} - номінальна деформація пружини, оvd.

Таблиця 4.2

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів для карми

Поліноміальні коефіцієнти	Порядок поліному					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX
a_0	-59,4985896	-59,2890159	-59,4350495	-60,8352669	-61,1024734	-62,4482056
a_1	2,3378146	2,383342	2,3808412	2,430404	2,5971917	2,5050862
a_2	-0,0073338	-0,0076761	-0,0075186	-0,0058324	-0,0062909	-0,0023297
a_3	-0,0000311	-0,0000389	-0,000039	-0,0000712	0,0001677	-0,0001245
a_4	$8,45742 \cdot 10^{-8}$	$1,62815 \cdot 10^{-7}$	$1,416 \cdot 10^{-7}$	$1,67130 \cdot 10^{-8}$	$8,32583 \cdot 10^{-7}$	$-9,79289 \cdot 10^{-7}$
a_5		$-1,78836 \cdot 10^{-10}$	$-3,08899 \cdot 10^{-11}$	$4,20751 \cdot 10^{-9}$	$1,26061 \cdot 10^{-8}$	$1,81908 \cdot 10^{-8}$
a_6			$-2,81803 \cdot 10^{-13}$	$-2,28700 \cdot 10^{-11}$	$-1,54142 \cdot 10^{-10}$	$1,83977 \cdot 10^{-11}$
a_7				$3,68788 \cdot 10^{-14}$	$6,0149 \cdot 10^{-13}$	$-1,15602 \cdot 10^{-12}$
a_8					$-8,06588 \cdot 10^{-16}$	$5,51833 \cdot 10^{-15}$
a_9						$-8,03164 \cdot 10^{-18}$
$\sum \theta^2$	401,7717577	388,5985531	388,3926909	368,043922	317,6564148	295,1436973
$\sigma_{[\%]}$	0,28	0,27	0,27	0,265	0,247	0,24

Як видно з табл. 4.1 і табл. 4.2, середньоквадратичне значення похибки в широкому температурному діапазоні як для константану, так і для карми має слабкий зв'язок з порядком поліному [53, 55, 59].

Постає потреба у майбутньому детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур, наприклад в межах від -50°C до $+100^\circ\text{C}$ [53, 55, 59].

4.2. Цифрова корекція похибки вимірювання тензодатчика

На основі здійсненого в [53, 55, 59] аналізу дестабілізуючих факторів встановлено, що серед основних дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання приладових систем, обладнаних тензодатчиками, є впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів, зокрема температури, вологості тощо [131].

Також нами було досліджено вплив діапазону зміни температур [53, 55, 59] для одного з найпоширеніших матеріалів, що застосовується для виготовлення тензорезисторів, а саме константану– сплаву з мінімальним температурним коефіцієнтом опору. Було досліджено розкид значень температурної похибки ($\pm 10\%$) на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами [53, 55, 59, 131].

З метою визначення залежності похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному був застосований пакету NUMERY як найбільш пристосований для вирішення задач обробки сигналів вимірювальної інформації, розроблений професором Шрюхером в монографії [131, 132].

За допомогою пакету NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному, в результаті чого було встановлено, що в широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв'язок з порядком поліному [131, 132].

Розглянемо поведінку поліноміальних коефіцієнтів у більш вузькому діапазоні температур від -50°C до $+100^{\circ}\text{C}$, взятих з таблиці 1.2 Розділу 1 та джерел [53, 55, 59].

Залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному була визначена за допомогою пакету NUMERY для двох сплавів: карми та константану (табл.4.3 і табл.4.4).

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках) $\sigma_{[\%]}$ визначалося згідно формули (4.3) [53, 59, 131].

Як свідчать розрахунки, при звуженні температурного діапазону похибка різко залежить від порядку апроксимуючого поліному і вже при шостому порядку практично стає нулевою [131].

Було також досліджено вплив точності запису табульованих значень на поліноміальні коефіцієнти і визначено, що випадкова похибка визначення коефіцієнтів розміром до $\pm 10\%$ для константана практично не впливає на значення середньоквадратичної похибки апроксимації [131].

Таблиця 4.3

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів (для карми)

Порядок поліному	Поліноміальні коефіцієнти							$\sum \theta^2$	$\sigma_{[\%]}$
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6		
IV	-63,1818182	2,07671	-0,0083273	0,0000165	$-5,81818 \cdot 10^{-8}$			705,1948052	0,54
V	-57,8246753	2,1524242	-0,0233273	0,0000565	$-4,7 \cdot 10^{-6}$	$-3,84 \cdot 10^{-8}$		608,7662338	0,5
VI	-70,0	3,4933333	0,0177333	-0,0021253	$-1,0667 \cdot 10^{-7}$	$6,016 \cdot 10^{-7}$	$-4,2667 \cdot 10^{-9}$	$2,09353 \cdot 10^{-20}$	10^{-11}

Це дає можливість спростити алгоритм цифрової корекції похибок тензодатчика по відношенню до способу, описаного в [57, 131].

Розглянемо спосіб цифрової температурної корекції похибок, який полягає в наступному [131]:

- 1) Визначаємо значення похибки для певних значень вхідної величини з кроком 10%, починаючи з «нуля»;

- 2) За визначеною температурою датчика визначаємо значення похибок для всіх реперних точок;
- 3) Апроксимуємо залежність поліномом шостого порядку;
- 4) Визначаємо поправку для отриманого результату вимірювання за цим поліномом і обчислюємо скорегований результат.

Таблиця 4.4

Таблиця поліноміальних коефіцієнтів (для константану)

Порядок поліному	Поліноміальні коефіцієнти							$\sum \theta^2$	$\sigma_{[\%]}$
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6		
IV	-13,521645	1,3580664	-0,0465485	0,0003526	$-1,640121 \cdot 10^{-6}$			60,1937229	0,16
V	-16,349026	1,6181061	-0,0386318	0,0003315	$-3,93455 \cdot 10^{-6}$	$2,02667 \cdot 10^{-8}$		33,3336039	0,12
VI	-13,50000	1,3043333	-0,04824	0,000842	$-2,8 \cdot 10^{-6}$	$-1,29493 \cdot 10^{-7}$	$9,984 \cdot 10^{-10}$	$1,60869 \cdot 10^{-24}$	10^{-10}

Для перевірки цього алгоритму промодельємо температурну похибку впливом зміни жорсткості пружини тензодатчика, зумовленої температурною залежністю модуля пружності E . Для пружинної сталі $\frac{\delta E}{dt} = -24 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$, що буде відповідати мультиплікативній похибці $\gamma = 24 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\%}{^\circ\text{C}}\right)$, а також не лінійність функції перетворення датчика модуляцією інших коефіцієнтів [55, 131].

Розглянемо ефективність запропонованого методу на наступному прикладі: будемо вважати, що матеріал, з якого виготовлена пружина тензодатчика, буде мати температурний коефіцієнт $\theta = \frac{\delta_E}{dt} = -10^{-3} (\frac{1}{^\circ\text{C}})$, що значно перевищує реальний температурний коефіцієнт пружинної сталі [131].

Тоді деформація пружини тензодатчика буде визначатися [131]:

$$\varepsilon_x = x + (1 + \theta) \cdot 10^{-3} \cdot t, \quad (4.4)$$

де x – «ідеальне» значення відносної деформації; θ – температурний коефіцієнт; t – робоча температура пружини.

За допомогою пакету NUMERY отримуємо коефіцієнти лінійної регресії підсумкової похибки від температури [131]:

$$\begin{aligned} y &= a_0 + a_1 x \\ \begin{cases} a_0 = 0,025 \\ a_1 = 0,000025, \\ \sum \delta_i = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4.5)$$

де y – абсолютна похибка; x – значення вимірювальної величини; a_0, a_1 – коефіцієнти лінійної регресії; $\sum \delta_i$ – сума квадратів нев'язок.

Обчислене значення вхідної величини за запропонованою методикою повністю співпадає з теоретичним значенням вхідної величини. Результати моделювання корекції похибок за вище визначеною методикою наведено в табл. 4.4 [131].

Отримуємо лінійну регресію залежності абсолютної похибки від значення вхідної величини [131].

В пакеті NUMERY по десяти реперним поліномам рахуємо їх значення при даній температурі, а саме $+25^{\circ}\text{C}$, а потім обчислюємо абсолютну температурну похибку [131].

При довільному значенні вхідної величини $\varepsilon = 35\%$ розраховуємо вихідну величину за функцією перетворення (4.4) [131].

Таблиця 4.4

Результати моделювання цифрової температурної корекції похибок

Ідеальне значення вимірювальної величини t	Температурна похибка $\varepsilon(t)$	Реальна деформація при 25°C $\varepsilon(25^{\circ}\text{C})$	Абсолютна температурна похибка $\delta = \varepsilon(25^{\circ}\text{C}) - \varepsilon(t)$, іод.
0	$\varepsilon_0 = 10^{-3} \cdot t$	$25 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$
10	$\varepsilon_{10} = 1,01 \cdot 10^{-3} \cdot t + 10$	10,02525	0,02525
20	$\varepsilon_{20} = 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot t + 20$	20,0255	0,0255
30	$\varepsilon_{30} = 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot t + 30$	30,02575	0,02575
40	$\varepsilon_{40} = 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot t + 40$	40,026	0,026
50	$\varepsilon_{50} = 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot t + 50$	50,02625	0,02625
60	$\varepsilon_{60} = 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot t + 60$	60,0265	0,0265
70	$\varepsilon_{70} = 1,07 \cdot 10^{-3} \cdot t + 70$	70,02675	0,02675
80	$\varepsilon_{80} = 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot t + 80$	80,027	0,027
90	$\varepsilon_{90} = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot t + 90$	90,02725	0,02725
100	$\varepsilon_{100} = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot t + 100$	100,0275	0,0275

Маємо:

$$\varepsilon_{35} = 1,035 \cdot 10^{-3} \cdot 25 + 35 = 35,025875,$$

тобто абсолютна температурна похибка $\delta = 0,025875$ (іод).

Визначаємо значення вимірювальної величини за запропонованим алгоритмом (4.5) в точці $\varepsilon = 35\%$. Вона теж становитиме 0,025875 (іод) [131].

Це означає, що запропонований алгоритм дозволяє коригувати похибки датчика за допомогою використання TEDS. Ефективність алгоритма в умовах нелінійності температурної похибки буде визначатися з точністю підгонки апроксимуючого полінома [131].

В табличній формі наведено апроксимуючі поліноми для датчиків на основі константану і показано, що похибка апроксимації буде вже практично нулевою при шостому порядку апроксимуючого поліному. Це означає, що відомий метод корекції похибок, запропонований Фішером, буде, практично, неможливо використати в даному випадку через значне зростання обсягу обчислень при збільшенні порядку поліномів, оскільки у цьому методі полінома обмежується третім порядком у зв'язку із значним збільшенням обчислень, необхідних при збільшенні порядку апроксимуючого поліному. В той же час, запропонований нами алгоритм цифрової температурної корекції похибок є вільним від зазначених недоліків через те, що не залежить від ступеню апроксимуючого поліному [131].

4.3. Автоматизований моделюючий повірочний комплекс приладової системи

Важливим інструментом дослідження, випробувань та повірки інформаційно-вимірювальних приладових систем управління, навігації, машинобудування та інших галузей техніки є автоматизовані моделюючі повірочні комплекси (АМПК). На основі АМПК можуть бути проведені натурні дослідження різноманітних характеристик і параметрів подібних реальних систем з використанням математичних і фізичних моделей. У порівнянні з математичним моделюванням натурні дослідження дають

набагато вищий ступінь достовірності [200, 202] оцінок параметрів систем, оскільки змодельовані в АМПК впливи наближаються до експлуатаційних.

Зв'язок досліджуваної системи з математичним забезпеченням при натурному моделюванні здійснюється за допомогою фізичних макетів і стендів реалізації впливів навколишнього оточення і процесорних модулів формування та обробки сигналів [203]. Поєднання різних математичних і фізичних моделей, а також різновид систем або їх складових частин визначає різноманіття вмісту натурних станів та має вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{dz(t)}{dt} &= f\{z(t), u(t), \psi(t)\}, \\ y(t) &= g\{z(t), u(t), v(t)\},\end{aligned}\tag{4.6}$$

де f, g - вектори функції, u - вектор невимірювальних збурень (завад), що діють на досліджувану систему, v - вектор завад спостережень і обробки сигналів.

Після серії експериментальних випробувань, в результаті яких визначається оцінка стану $\hat{z}(t)$ досліджуваної системи, параметри останньої можуть бути оптимізовані відповідно до її цільової функції.

Вплив в комплексі невимірювальних завад призводить до помилок у вимірюваннях, величина яких зменшується з ростом кількості дослідів, тобто зі збільшенням тимчасового інтервалу досліджень статистичні властивості вектору станів $\hat{z}(t)$ системи описуються апостеріорною щільністю розподілу імовірностей:

$$w_1(z/y) = \frac{w_0(z)w_n(y/z)}{w_y},\tag{4.7}$$

де $w_0(z)$ - апіорна щільність розподілу імовірностей вектора z ; $w_n(y/z)$ - багатовимірна функція правдоподібності; $w(y)$ - щільність розподілу вектору спостереження.

На рис.4.1. представлено модель повірочного комплексу приладової системи.

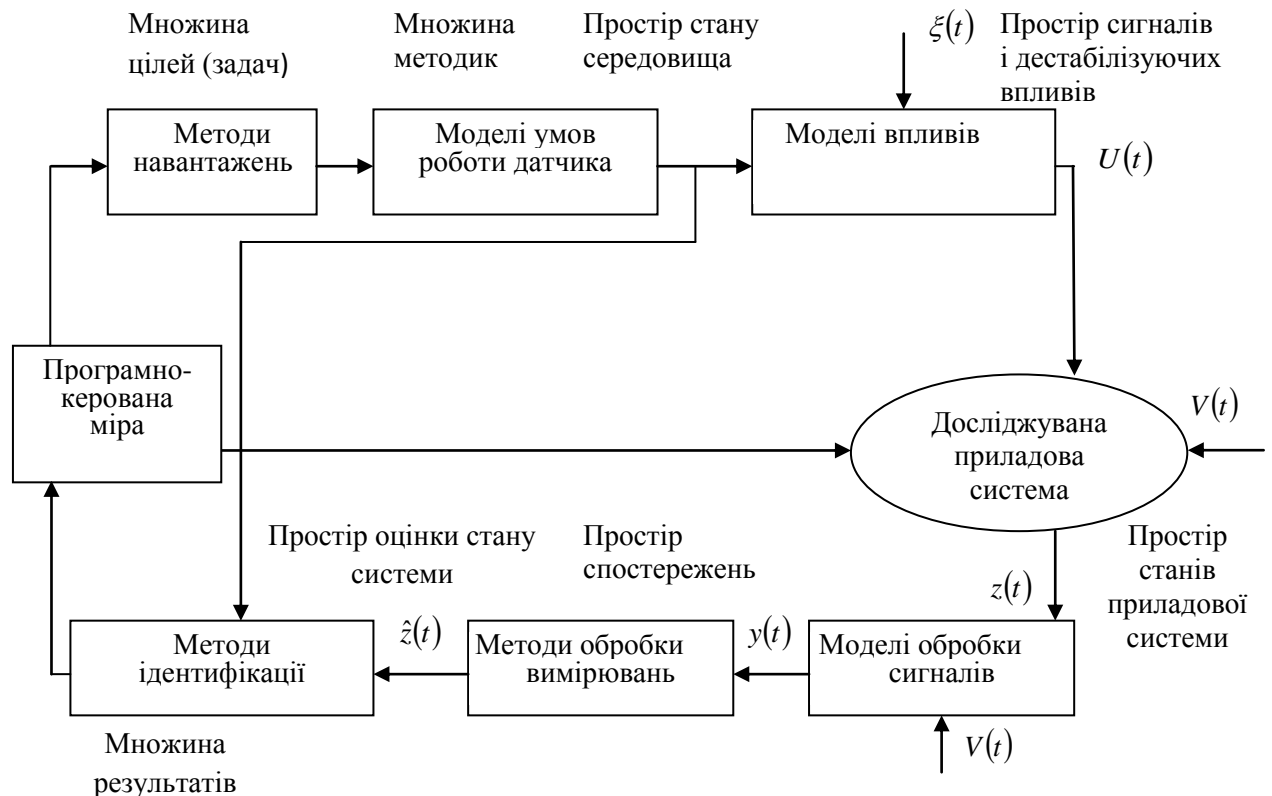


Рис. 4.1 - Модель повірочного комплексу приладової системи

При автоматизованій повірці засобів вимірювання найчастіше застосовують метод каліброваних сигналів. Найбільш високий рівень автоматизації повірки з використанням калібраторів досягається при використанні програмно – керованої міри. Як показано на рис. 4.1, на повірочний засіб вимірювань подається тестовий сигнал з керованої ПК міри. Сигнал, що спостерігається на виході повірочного засобу, перетворюється у цифровий код і порівнюється з кодом тестового сигналу. На основі порівняння кодів визначається похибка в певній точці діапазону вимірювання. Процедура, згідно якої обробка результатів вимірювань

здійснюється за певним програмним алгоритмом, повторюється в кожній повіряємій точці шкали засобу вимірювання.

Повірка методів взірцевих приладів заключається в тому, що на повірочну приладову систему подається некалібрований сигнал, значення якого автоматично встановлює відліковий пристрій приладової системи на повірочну відмітку шкали. Це значення сигналу вимірюється взірцевим засобом вимірювання. Значення сигналу з відлікового пристрою та взірцевого обробляється за допомогою ПК з метою розрахунку метрологічних характеристик повірочного приладу.

В такій установці можуть повірятися також вимірювальні перетворювачі. На вхід перетворювача подаються сигнали на повіряємій перетворювач, що вказані у нормативній документації. Оптимальним буде такий метод повірки, коли при зниженні затрат на проведення повірки підвищиться якість повірки засобів вимірювань.

Мінімізація помилок оцінювання вектора z пов'язана з визначенням центра ваги \hat{z} функції $w_1(z/y)$ при отриманому значенні вектора спостережень y .

Інтегральна апостеріорна помилка оцінювання вектора стану I_1 (невизначеність стану системи) залежить від гіпероб'єма тіла, обчислюваного при $w_1 = \text{const}$, величина якого дорівнює:

$$I_1 = C_1 \prod_{i=1}^k \sigma_{1i}, \quad (4.8)$$

де C_1 - коеф-фіцієнт пропорційності; σ_{1i} - середня квадратична помилка вимірювань-ня складової i вектора z , k - число складових вектора.

З огляду на те, що апіорна невизначеність стану системи є $I_0 = C_0 \prod_{i=1}^k \sigma_{0i}$, введемо показник ефективності натурних досліджень.

$$E = \frac{I_0}{I_1} = C \prod_{i=1}^k \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{1i}}.$$

Очевидно, що для ефективного комплексу випробувань

$$E > 1, E_i = \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{1i}} \geq 1.$$

При проектуванні АМПК необхідно керуватися рядом основних принципів. Одним з них є принцип системного підходу, який визначає створення гнучких апаратно-програмних засобів автоматизації управління технологіями випробуванні відповідно до критеріїв функціонування моделюючого комплексу. Крім того, важливим є принцип адаптивності і розвитку, що дозволяє адаптувати конфігурацію АМПК для проведення досліджень конкретної системи, який забезпечує подальший розвиток комплексу, що пов'язано з модернізацією та оновленням завдань випробувань. І, на кінець, принцип уніфікації і модульності, що зменшує номенклатуру складових частин АМПК, що надає гнучкість процесів підготовки і проведення випробувань, що в результаті знижує вартість комплексу.

Досвід розробки та експериментальної експлуатації показує, що основними характеристиками функціонування АМПК є п'ять показників: адекватність моделей сигналів і впливів, точність оцінювання параметрів стану досліджуваної системи, час дослідження системи, надійність роботи комплексу, вартість АМПК.

Адекватність моделей визначає апаратну і програмну складність АМПК, а значить, впливає на його надійність і вартість, а також заодно з показником точності оцінювання, що характеризується вектором середньоквадратичних похибок вимірювання вектора станів z системи, встановлює ступінь достовірності напівнатурних досліджень.

Час дослідження системи t_i включає повний час від підготовки до закінчення дослідження системи і визначає складність і тим самим вартість

АМПК. Складовими показника t_i є: t_p - час підготовки експерименту, t_e - час проведення експерименту і t_0 - час обробки експериментальних даних, тобто $t_i = t_p + t_e + t_0$.

Експеримент в АМПК проводиться в реальному часі. Тому параметр t_e не може бути безпідставно зменшено або збільшено і визначається достатнім обсягом статистики про досліджувану систему, необхідної для її ідентифікації.

У програмно-апаратному повірочному комплексі натурного моделювання час на підготовку експерименту обчислюється як [200]:

$$t_n = \sum_{i=1}^m (t_{ri} + t_{ai} + t_{ci}) + t_b, \quad (4.9)$$

де t_{ri} - час створення файлу і значень сигналу, t_{ai} - час атестації параметрів сигналу, t_{ci} - час завантаження файлу в формувач сигналу, m - загальна кількість одночасно сформованих сигналів, t_b - час введення вихідних даних для моделювання.

Час генерації файлу є пропорційним числу відліків в файлі. Час атестації t_{ai} параметрів сигналу i залежить від методу оцінювання параметрів. У загальному випадку для випадкових сигналів необхідно використовувати кореляційно-спектральний аналіз [204, 206-208]. Тоді час атестації є пропорційним квадрату числа відліків у файлі і є найбільш ємною величиною в виразі для часу на підготовку експерименту t_n . Зменшення t_n пов'язане з повною апаратною реалізацією формувача сигналів. При цьому процес генерації відліків, а також атестації параметрів протікає паралельно в реальному масштабі часу проведення експерименту, тому $t_n = t_b$. Іншим рішенням по скороченню t_n є формування бібліотеки типових проатестованих сигналів, які використовуються для випробувань системи.

Час обробки експериментальних даних t_0 визначається часом розрахунку t_p діагностованих параметрів системи і виведення (документування) інформації. Розрахунок діагностованих параметрів при високій продуктивності спеціалізованого процесора обробки може протікати паралельно з експериментом, тоді $t_p=0$. В іншому випадку розрахунок проводиться після закінчення експерименту і величина t_p пропорційна часу проведення експерименту t_e .

При розробці АМПК є природним прагнення досягти найкращих значень кожного з показників комплексу. Однак поліпшення одного з показників може викликати через протидіючі зв'язки погіршення ряду інших показників. Заслугує на увагу критерій оптимізації АМПК [209, 210], коли виділяються два головних показника:

- 1) технічний, що визначає корисність системи;
- 2) Економічний або плата за корисність (вартість АМПК).

Оптимізація системи проводиться шляхом вибору найбільш прийняттого варіанту за цими двома показниками при обмеженні на інші показники комплексу.

З п'яти названих показників АМПК поняттю корисності найбільш задовольняє такий показник як час дослідження системи. Моделюючий комплекс призначений для заміни дорогих за витратами часу і матеріальних засобів натурних випробувань напівнатурними. Тому чим менше показник t_i , тим вище корисність АМПК. Однак зі зменшенням t_i , зростають витрати на досягнення його значення і вартість комплексу. Остання залежить не тільки від головного параметра t_i , але і від параметрів адекватності, а також від помилок оцінювання параметрів досліджуваної системи. Оптимізація комплексу пов'язана з найкращим поєднанням програмно-апаратних засобів в рамках описаного критерію оптимізації.

Реалізований відповідно до рис.4.1 комплекс вирішує такі основні завдання випробування і перевірки приладової системи:

- моделювання динаміки датчика з довільним положенням об'єкта вимірювання з різними рівнями моделювання;
- формування адекватної електромагнітної обстановки (сигналів і завад);
- моделювання середовища поширення сигналів;
- оперативної зміни вихідних даних, динамічного управління процесом випробувань в реальному часі;
- збору та обробки поточних значень параметрів датчиків системи і відображення в реальному часі;
- спектрально-кореляційного аналізу та документування результатів досліджень.

До складу комплексу входять ПК IBM моделювання динамічних параметрів обстановки і впливів, ПК IBM фіксації і обробки станів випробовуваної системи, спеціалізований електронний блок формування електромагнітних впливів і збору інформації про стан системи, програмне забезпечення. Електронний блок містить цифрові елементи, в тому числі сигнальні процесори, аналогові вузли для роботи системи в складі приладової системи, перетворювачі інформації та сполучення. Програмне забезпечення відкрито, дозволяє нарощування і побудоване за модульним принципом, з можливістю програмної реконфігурації комплексу під дослідження конкретної системи.

Основи використання імітаційного моделювання для встановлення значень характеристик похибок витікають із структури вимірювальної процедури і способів визначення похибок та їхніх характеристик. При розробці принципів застосування імітаційного моделювання в метрології було використано досвід, накопичений в суміжних галузях техніки, зокрема в автоматичному управлінні, вимірювальній техніці, радіотехніці та ін.

У відповідності до [196], під імітаційним моделюванням слід розуміти «метод математичного моделювання, при якому використовують пряму підстановку чисел, що імітують зовнішні впливи, параметри та змінні

процесів, в математичні моделі процесів та апаратури», тобто метод, що базується на відтворенні процедури вимірювання в числовій формі за допомогою ПК. Таким чином, для імітаційного моделювання процесу вимірювання необхідно мати програмну систему, до складу якої входять програми відтворення вхідних впливів, аналогових вимірювальних перетворень, аналогово-цифрових перетворень, процесорних вимірювальних перетворень, а також програми обробки результатів моделювання.

Розрахунок математичної методичної похибки і середнього квадратичного відхилення методичної похибки при квантуванні суми вхідних впливів і адитивної завади.

Нехай x_j та n_j відповідно вхідний вплив і завада в j -му вимірювальному експерименті. На вхід АЦП поступає сума $x_j + n_j$. Тоді прийнятий алгоритм (рівняння вимірювань) матиме вигляд:

$$x_j^* = \left[[x_j + n_j]_{\Delta_n x} [m_x]_0 \right]_0$$

Оскільки істинне значення x_j визначається рівнянням:

$$x_j = \left[[x_j]_0 [m_x]_0 \right]_0$$

то методична похибка буде:

$$\Delta_m x_j^* = \left[[x_j + n_j]_{\Delta_n x} [m_x]_0 \right]_0 - \left[[x_j]_0 [m_x]_0 \right]_0 = \Delta_n^M x_j^* + \Delta_k^M x_j^*,$$

де

$$\Delta_n^M x_j^* = \left[[x_j + n_j]_0 [m_x]_0 \right]_0 - \left[[x_j]_0 [m_x]_0 \right]_0$$

$$\Delta_k^M x_j^* = \left[[x_j + n_j]_{\Delta_n x} [m_x]_0 \right]_0 - \left[[x_j + n_j]_0 [m_x]_0 \right]_0.$$

Перша складова дорівнює n_j і її характеристики відповідають характеристикам завади, тобто:

$$M[\Delta_n^M x_j^*] = M[n_j]; \quad D[\Delta_n^M x_j^*] = D[n_j].$$

Друга складова обумовлена квантуванням суми двох випадкових величин: $z = x + n$. Відповідно для визначення характеристик $\Delta_n^M x_j^*$ необхідно встановити вид щільності розподілу імовірності $w(z)$. В загальному випадку щільність розподілу імовірності суми двох випадкових величин визначатиметься наступним чином:

$$w(z) = \frac{dF(z)}{dz},$$

де

$$F(z) = \iint_{x+n < z} w(x) w(n) dx dn.$$

Конкретизуємо властивості вхідного впливу і завади. Приймаємо:

$$w(x) = \begin{cases} \frac{1}{X_{max}} & \text{при } x \in [0, X_{max}] \\ 0 & \text{при } x \notin [0, X_{max}] \end{cases},$$

$$w(n) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta n} & \text{при } x \in \left[-\frac{\Delta n}{2}, \frac{\Delta n}{2}\right] \\ 0 & \text{при } x \notin \left[-\frac{\Delta n}{2}, \frac{\Delta n}{2}\right] \end{cases}.$$

Тоді:

$$w(z) = \begin{cases} \frac{2}{X_{max}\Delta n} + \frac{1}{2X_{max}} & \text{при } z \in [-\frac{\Delta n}{2}, \frac{\Delta n}{2}) \\ \frac{1}{X_{max}} & \text{при } z \in [\frac{\Delta n}{2}, X_{max} - \frac{\Delta n}{2}) \\ -\frac{2}{X_{max}\Delta n} + \frac{2}{X_{max}\Delta n} \left(X_{max} + \frac{\Delta n}{2} \right) & \text{при } z \in [X_{max} - \frac{\Delta n}{2}, X_{max} + \frac{\Delta n}{2}) \\ 0 & \text{при } z \notin [-\frac{\Delta n}{2}, X_{max} + \frac{\Delta n}{2}] \end{cases}$$

Відповідно при $\Delta n > \Delta_k x$ матимемо:

$$w(\Delta_k^M x_j^*) = \begin{cases} \frac{\Delta_k x_j^*}{X_{max}\Delta n} + \frac{1}{X_{max}\Delta n} \left(\Delta_h x + \frac{\Delta n}{2} \right) & \text{при } \Delta_k x_j^* \in [-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_h x, -\frac{\Delta_h x}{2}) \\ \frac{p}{\Delta_h x} & \text{при } \Delta_k x_j^* \in [-\frac{\Delta_h x}{2}, \frac{\Delta_h x}{2}) \\ -\frac{\Delta_k x_j^*}{X_{max}\Delta n} + \frac{1}{2X_{max}} & \text{при } \Delta_k x_j^* \in [-\frac{\Delta_k x}{2}, \frac{\Delta n}{2}) \\ 0 & \text{при } \Delta_k x_j^* \notin [-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_h x, \frac{\Delta n}{2}] \end{cases}$$

де $\Delta_k x = \frac{X_{max}}{2q}$ – це інтервал квантування (q – розрядність АЦП);

$$p = 1 - \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_h x}^{-\frac{\Delta_k x}{2}} \frac{1}{X_{max}\Delta n} \left(y + \Delta_k x + \frac{\Delta n}{2} \right) dy - \int_{\frac{\Delta_k x}{2}}^{\frac{\Delta n}{2}} \left(-\frac{1}{X_{max}\Delta n} + \frac{1}{2X_{max}} \right) dy$$

При $\Delta n \leq \Delta_k x$ матимемо:

$$w(\Delta_k x_j^*) = \begin{cases} \frac{\Delta_k x_j^*}{X_{max} \Delta n} + \frac{1}{X_{max} \Delta n} \left(\Delta_n x + \frac{\Delta n}{2} \right) & \text{при } \Delta_k x_j^* \in \left[-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x, -\frac{\Delta_k x}{2} \right) \\ \frac{p}{\Delta_k x} & \text{при } \Delta_k x_j^* \in \left[-\frac{\Delta_k x}{2}, \frac{\Delta_k x}{2} \right) \\ 0 & \text{при } \Delta_k x_j^* \notin \left[-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x, \frac{\Delta n}{2} \right] \end{cases},$$

причому $p = 1 - \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x}^{-\frac{\Delta_k x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} \left(y + \Delta_n x + \frac{\Delta n}{2} \right) dy.$

Систематична методична похибка буде:

$$M[\Delta_n x_j^*] = M[\Delta_n^M x_j^*] + M[\Delta_k^M x_j^*].$$

Оскільки $M[\Delta_n^M x_j^*] = 0$, тоді маємо:

$$M[\Delta_n x_j^*] = M[\Delta_k^M x_j^*] = \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x}^{-\frac{\Delta_k x}{2}} \Delta_n x_j^* w(\Delta_k^M x_j^*) d\Delta_k x_j^*.$$

При $\Delta n \leq \Delta_k x$ матимемо:

$$M[\Delta_n x_j^*] = \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x}^{-\frac{\Delta_k x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} \left(y + \frac{\Delta n}{2} + \Delta_n x \right) dy$$

та при $\Delta n > \Delta_k x$ матимемо:

$$M[\Delta_n x_j^*] = \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x}^{-\frac{\Delta_n x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} \left(y + \frac{\Delta n}{2} + \Delta_n x \right) dy + \\ + \int_{-\frac{\Delta_n x}{2}}^{\frac{\Delta n}{2}} \left(-\frac{y}{X_{max} \Delta n} + \frac{1}{2X_{max}} \right) dy.$$

Середнє квадратичне відхилення методичної похибки визначається за допомогою наступного співвідношення:

$$D[\Delta_m x_j^*] = [D[\Delta_n^m x_j^*] + D[\Delta_k^m x_j^*] + 2M[\Delta_n^m x_j^* \Delta_k^m x_j^*]]$$

де $\Delta_n^m x_j^*$ та $\Delta_k^m x_j^*$ - відцентровані значення складових методичної похибки $\Delta_n^m x_j^*$ та $\Delta_k^m x_j^*$.

У відповідності з видом розподілу $w(\Delta_n^m x_j^*) = w(n_j)$ маємо:

$$D[\Delta_n^m x_j^*] = \frac{\Delta_n^2}{12}.$$

Враховуючи $w(\Delta_n^m x_j^*)$ при $\Delta n \leq \Delta_n x$, маємо:

$$D[\Delta_n^m x_j^*] = \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_n x}^{-\frac{\Delta_n x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} (y - M[\Delta_n^m x_j^*])^2 \times \\ \times \left(y + \frac{\Delta n}{2} + \Delta_n x \right) dx + \frac{p^2 \Delta_n^2 x}{12},$$

а при $\Delta n > \Delta_n x$ буде:

$$\begin{aligned}
D[\Delta_n^M x_j^*] = & \int_{-\frac{\Delta_n}{2} - \Delta_\kappa x}^{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} (y - M[\Delta_n^M x_j^*])^2 \times \\
& \times \left(y + \frac{\Delta n}{2} + \Delta_\kappa x \right) dx + \frac{p^2 \Delta_\kappa^2 x}{12} + \\
& + \int_{\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{\frac{\Delta n}{2}} \left(\frac{y}{X_{max} \Delta n} + \frac{1}{2X_{max}} \right) (y - M[\Delta_n^M x_j^*])^2 dy.
\end{aligned}$$

Тоді матимемо:

$$\begin{aligned}
& M[\dot{\Delta}_n^M x_j^* \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*] = \\
& = \int_{-\frac{\Delta_n}{2}}^{+\frac{\Delta n}{2}} \int_{-\frac{\Delta_n}{2} - \Delta_\kappa x}^{+\frac{\Delta n}{2}} \dot{\Delta}_n^M x_j^* \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* w(\dot{\Delta}_n^M x_j^*, \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*) d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*.
\end{aligned}$$

Оскільки двовимірною функцією розподілу імовірності може бути представлена у вигляді виразу:

$$w(\dot{\Delta}_n^M x_j^*, \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*) = (\dot{\Delta}_n^M x_j^*) w(\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* / \dot{\Delta}_n^M x_j^*),$$

$$w(\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* / \dot{\Delta}_n^M x_j^*) = \begin{cases} \frac{p_1}{\Delta_\kappa x} & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \in \left[-\frac{\Delta_\kappa x}{2}, \frac{\Delta_\kappa x}{2} \right) \\ \frac{1}{X_{max}} & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \in \left[-\frac{\Delta_\kappa x}{2}, -n_j \right), \\ 0 & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \notin \left[-\frac{\Delta_\kappa x}{2}, -n_j \right] \end{cases}$$

Якщо $\dot{\Delta}_n^M x_j^* < -\frac{\Delta_\kappa x}{2}$, тоді:

$$w(\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* / \dot{\Delta}_n^M x_j^*) = \begin{cases} \frac{p_2}{\Delta_\kappa x} & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \in \left[-\frac{\Delta_\kappa x}{2}, \frac{\Delta_\kappa x}{2}\right) \\ \frac{1}{x_{max}} & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \in \left[-\Delta_\kappa x - n_j, -\frac{\Delta_\kappa x}{2}\right), \\ 0 & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \notin \left[-\Delta_\kappa x - n_j, \frac{\Delta_\kappa x}{2}\right] \end{cases}$$

Якщо $\dot{\Delta}_n^M x_j^* \geq \frac{\Delta_\kappa x}{2}$, тоді:

$$p_1 = \int_{\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{-n_j} \frac{dy}{x_{max}}$$

та

$$p_2 = 1 - \int_{-\Delta_\kappa x - n_j}^{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{dy}{x_{max}}$$

Слід мати на увазі, що умовні щільність розподілу імовірності $w(\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* / \dot{\Delta}_n^M x_j^*)$ отримаємо за умови, якщо:

$$w(\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_\kappa x} & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \in \left[-\frac{\Delta_\kappa x}{2}, \frac{\Delta_\kappa x}{2}\right] \\ 0 & \text{при } \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \notin \left[-\frac{\Delta_\kappa x}{2}, \frac{\Delta_\kappa x}{2}\right] \end{cases}$$

Дане припущення є правомірним за умови $\Delta n \leq x_{max}$, оскільки дана умова на практиці завжди виконується.

В результаті маємо:

$$\begin{aligned}
& M[\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* \dot{\Delta}_n^M x_j^*] = \\
& = \int_{-\frac{\Delta n}{2}}^{\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \dot{\Delta}_n^M x_j^* \left(\int_{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{+\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{p_1 \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*}{\Delta_\kappa x \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* + \int_{\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{-n_j} \frac{\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* \right) d\dot{\Delta}_n^M x_j^* + \\
& + \int_{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{+\frac{\Delta n}{2}} \dot{\Delta}_n^M x_j^* \left(\int_{-\Delta_\kappa x - n_j}^{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* + \int_{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{+\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{p_2 \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*}{\Delta_\kappa x \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* \right) d\dot{\Delta}_n^M x_j^* = \\
& = \int_{-\frac{\Delta n}{2}}^{\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \int_{\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{-n_j} \frac{\dot{\Delta}_n^M x_j^* \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* + \\
& + \int_{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}}^{+\frac{\Delta n}{2}} \int_{-\Delta_\kappa x - n_j}^{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{\dot{\Delta}_n^M x_j^* \dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*.
\end{aligned}$$

Таким чином, маємо визначеними усі складові, що входять у співвідношення для $D^{1/2}[\Delta_\kappa x_j^*]$.

При умові $\Delta n \leq \Delta_\kappa x$, маємо:

$$\begin{aligned}
D^{1/2}[\Delta_\kappa x_j^*] &= \left[\frac{\Delta_\kappa^2 n}{12} + \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_\kappa x}^{-\frac{\Delta_\kappa x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} (\Delta_\kappa x_j^* - M[\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^*])^2 \times \right. \\
&\quad \left. \times \left(\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* + \frac{\Delta n}{2} + \Delta_\kappa x \right) d\dot{\Delta}_\kappa^M x_j^* + \frac{p_2 \Delta_\kappa^2 x}{12} + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{-\frac{\Delta_K x}{2}}^{\frac{\Delta_K x}{2}} \int_{-\frac{\Delta n}{2}}^{-n_j} \frac{\dot{\Delta}_n^M x_j^* \Delta_K^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_K^M x_j^* + \\
& + \int_{-\frac{\Delta_K x}{2}}^{\frac{\Delta n}{2}} \int_{-\Delta_K^{x-n_j}}^{-\frac{\Delta_K x}{2}} \frac{\dot{\Delta}_n^M x_j^* \Delta_K^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_K^M x_j^* \Bigg]^{1/2},
\end{aligned}$$

А при умові $\Delta n > \Delta_K x$, маємо:

$$\begin{aligned}
D^{1/2} = [\Delta_M x_j^*] &= \left[\frac{\Delta_K^2 n}{12} + \int_{-\frac{\Delta n}{2} - \Delta_K x}^{\frac{\Delta_K x}{2}} \frac{1}{X_{max} \Delta n} (\Delta_M x_j^* - M[\dot{\Delta}_K^M x_j^*])^2 \times \right. \\
&\times \left(\dot{\Delta}_K^M x_j^* + \frac{\Delta n}{2} + \Delta_K x \right) d\dot{\Delta}_K^M x_j^* + \frac{p_2 \Delta_K^2 x}{12} + \\
&+ \int_{\frac{\Delta_K x}{2}}^{\frac{\Delta n}{2}} \left(-\frac{\dot{\Delta}_K^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} + \frac{1}{2X_{max}} \right) (\Delta_M x_j^* - M[\dot{\Delta}_K^M x_j^*])^2 d\dot{\Delta}_K^M x_j^* + \\
&+ \int_{-\frac{\Delta_K x}{2}}^{\frac{\Delta_K x}{2}} \int_{-\frac{\Delta n}{2}}^{-n_j} \frac{\dot{\Delta}_n^M x_j^* \Delta_K^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_K^M x_j^* + \\
&+ \int_{-\frac{\Delta_K x}{2}}^{\frac{\Delta n}{2}} \int_{-\Delta_K^{x-n_j}}^{-\frac{\Delta_K x}{2}} \frac{\dot{\Delta}_n^M x_j^* \Delta_K^M x_j^*}{X_{max} \Delta n} d\dot{\Delta}_n^M x_j^* d\dot{\Delta}_K^M x_j^* \Bigg]^{1/2}.
\end{aligned}$$

Висновки по розділу 4

1. Дослідженнями встановлено, що похибка, викликана зміною температури в декілька градусів в межах 24°C , є досить малою (менше $0,5 \text{ мкм/м}^{\circ}\text{C}$). Однак при суттєвих змінах температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. З цією метою необхідно виміряти температуру поблизу датчика і використати залежність вимірювальної похибки від температури.
2. На основі здійсненого аналізу дестабілізуючих факторів встановлено, що серед основних дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання приладових систем, обладнаних тензодатчиками, є впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів, зокрема температури, вологості тощо.
3. За допомогою пакету NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого поліному, в результаті чого було встановлено, що в широкому температурному діапазоні похибка для константану та карми має слабкий зв'язок з порядком поліному. Було також досліджено вплив точності запису табульованих значень на поліноміальні коефіцієнти і визначено, що випадкова похибка визначення коефіцієнтів розміром до $\pm 10\%$ для константана та карми, практично, не впливає на значення середньоквадратичної похибки апроксимації.
4. Вперше розроблено метод автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено – деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків, який, на відміну від існуючих, дозволяє більш ефективно коригувати похибки вимірювального каналу та розроблено метод корекції інструментальної випадкової похибки, зумовленої неідеальністю активних компонентів, опору ліній зв'язку та аналогових комутаторів при дистанційному вимірюванні тензодатчиком на основі математичних моделей метрологічних характеристик, які являють собою

низькочастотні корельовані шуми.

5. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу параметрів напружено – деформованого стану від завад нормального виду, у тому числі за умови не лінійності функції перетворення аналогового інтерфейсу, котрий, на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищення точності вимірювань та покращення завадо захищеності аналогового інтерфейсу в умовах апроксимації нелінійних функцій перетворення вимірювальних сигналів.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження були проведені в лабораторних умовах на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Реєстрація даних в ході випробовувань та обробка отриманої інформації здійснювалися за допомогою програмно-апаратного комплексу (приладової системи), створеного на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Випробовування здійснювалися на основі тензорезисторного способу вимірювання напружень.

Основні результати даного розділу викладено в роботах автора, а саме [45-49, 54, 56, 63-65, 67-69].

5.1 Експериментальні дослідження тензорезисторного способу вимірювання

Експериментальні неруйнівні методи вимірювання напружень базуються на вимірюванні деформації елементів конструкції різними тензомерами, зокрема, механіко-оптичними та іншими пристроями, що вимірюють деформаційні зміщення безпосередньо випробувального об'єкта. Однак це є можливим при випробовуванні конструкції пробними навантаженнями, тобто для визначення приросту напруження без урахування величин вже наявних напружень, сформованих до наклеювання або улаштування інших тензометрів. При цьому способі вимірювання деформації в завантажуваних елементах конструкції вимірювання деформації здійснюється за рахунок різниці показів індикаторних приладів до та після

навантаження. Цей факт унеможливорює його застосування в попередньо завантажених елементах конструкції, що є недоліком даного способу.

У багатьох випадках неможливо фіксувати приріст деформацій, оскільки елемент може перебувати в граничному стані, і навантаженість пробним навантаженням може довести елемент конструкції до руйнування. У зв'язку з цим виникає потреба вимірювання наявних напружень в навантажених елементах конструкцій, щоб в подальшому проводити неруйнівний контроль матеріалів, правильно і безпечно експлуатувати елементи і конструкцію в цілому.

Запропонований тензорезисторний спосіб вимірювання напружень [62-68] відрізняється тим, що спочатку знімаються покази індикаторного приладу навантаженого елемента конструкції, а потім знімаються покази індикаторного приладу, точно такого ж не навантаженого еталонного елемента конструкції і за різницею показів визначаємо величину напружень в навантаженому елементі конструкції.

Тензорезисторний спосіб вимірювання напружень в елементах конструкцій здійснюється таким чином. На завантажений елемент заклеюється один з типів тензорезисторів і вимірюється напруження за допомогою індикаторного приладу. Після цього на точно такий же, тільки ненавантажений еталонний елемент наклеюється аналогічний тензорезистор і знімаються покази індикаторного приладу. За різницею показів індикаторних приладів визначаємо величину напружень в навантажених елементах конструкції.

Для дослідження тензорезисторного способу вимірювання напруження був здійснений експеримент, для якого нами була обрана сталеві балка рівного опору (рис. 5.1.).

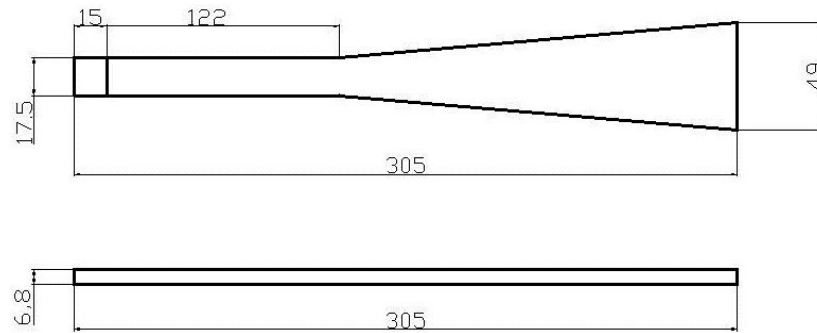


Рис. 5.1 – План-схема експериментальної навантажувальної сталеві балки

Випробовування зразка проводилися за допомогою експериментальної механічної установки, на якій здійснювався вигин балки за допомогою її поступового привантаження.

У нашому експерименті використовувався дрітаний тензорезистор загального призначення.

Параметри датчиків: база - 20 мм; $R = 201,7 \pm 0,3$ Ом; $S = 2,04$; $V = 1,11$; $\Gamma_i = 0,13$; $ТКС = 2,79$.

Реєстрація даних в ході випробовувань та обробка отриманої інформації здійснювалися за допомогою програмно-апаратного комплексу, створеного на базі кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Загальний вигляд програмно-апаратного вимірювального комплексу показано на рис. 5.2.

У апаратну частину комплексу входять: блок введення аналогових сигналів, включаючи прецизійні джерела живлення, в тому числі - для тензометричних датчиків; системний блок аналого-цифрового перетворення на основі дельта-сигма АЦП і обчислювального пристрою з монітором та клавіатурою. Основні технічні дані і характеристики системи наведено в табл. 5.1.

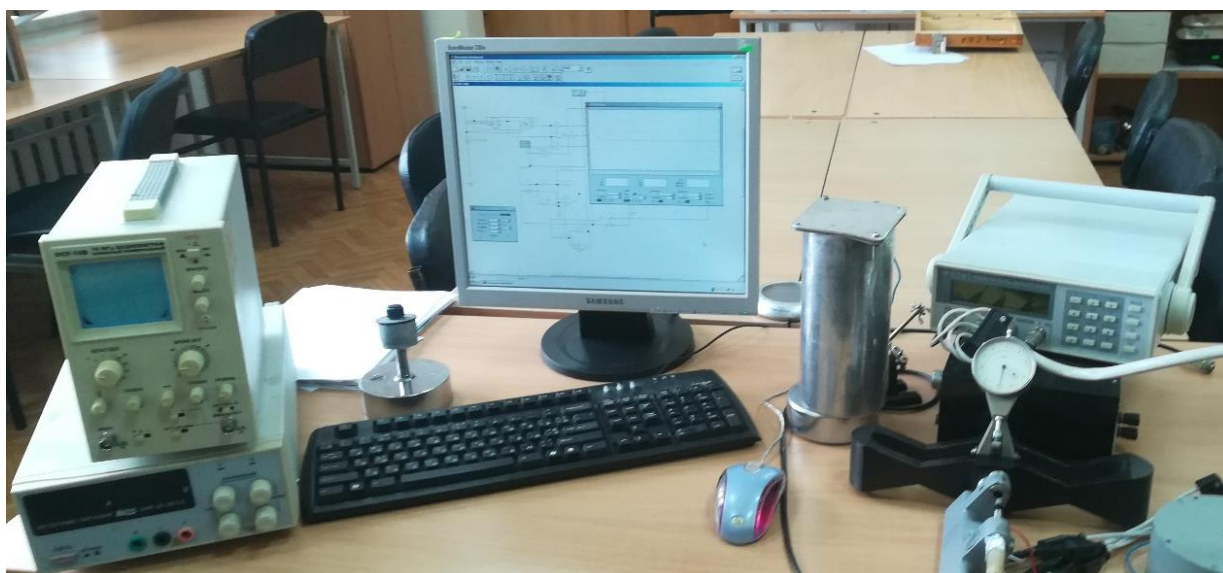


Рис. 5.2 – Приладова система (програмно-апаратний комплекс) вимірювання напружень

У більшості випадків тензорезисторні прилади можуть зареєструвати відносні деформації, відповідні 20 мПа. Застосована нами приладова система дозволяє зареєструвати деформації, відповідні 2 мПа, що дозволяє фіксувати незначні відносні деформації, які були недоступні при вимірюванні іншими вимірювальними приладами.

Таблиця 5.1.

Технічні дані і характеристики приладової системи

Параметри	Величина
Кількість вимірювальних каналів	64
Динамічний діапазон вимірювального тракту, дБ	90
Частота дискретизації на канал, кГц	до 48
Точність вимірювань віброприскорень, % від діапазону	± 0.5
Точність вимірювань відносних подовжень, % від діапазону	± 0.1
Відстань встановлюваних датчиків вимірювання від мобільного комп'ютера, м	до 100
Робочий діапазон температур, °C	-30...+80

Система також дозволяє реєструвати сигнали від датчиків різних типів одними і тими ж каналами АЦП. Зокрема, вона може працювати з прецизійними акселерометрами, мостовими або напівмостовими схемами із тензодатчиков опором 50 Ом і більше, а також з терморезисторами, п'єзодатчики, потенціометричними, індуктивними, ємнісними і іншими типами датчиків без використання вторинних перетворювачів при вимірюванні постійних і змінних у часі сигналів. Оскільки дана апаратура може вловити малі величини напружень у конструкціях при їх вимірюванні, для виключення дрейфів від різних явищ, зокрема прогрівання каналів вимірювання, шумів, температурних перепадів, зміни напружень в електропередачі, підключення кондиціонера, відкривання вікон і дверей, ходьби при вимірюванні, повітрообміну, радіохвиль, було прийнято рішення вимірювати напруження в балці двома каналами: опорним і робочим (підключення двох тензорезисторів).

Для реєстрації омичного опору тензорезистора при його живленні змінним або постійним струмом було застосовано схему моста Уїтстона при вимірюванні деформації вигину. Для цього тензорезистори розміщуємо на найбільш віддалених від осі волокнах матеріалу і включаємо в суміжні плечі тензомоста так, щоб прирости їх склалися, а розтягування і стиснення взаємно знищувалися [136].

Особливість експерименту (рис. 5.3) полягала в тому, що експериментальну балку рівного опору розмірами 305 мм х 49 мм х 17,5 мм х $t = 6,8$ мм спочатку привантажили гирями загальною вагою 7 кг (за теоретичними розрахунками, приблизно $\sigma = (570 \dots 590)$ кг / см², і після навантаження наклеїли тензорезистор (1) на цю балку. Клей тензорезистора (1) осушили по стандартам наклейки (12 годин), і після цього зняли всі гирі. В даному експерименті тензорезистор (1) був в стисненому стані, оскільки балка була розвантажена. Потім наклеїли робочий тензорезистор (2), і осушили його згідно стандартам наклеювання. Через 12 годин після наклеювання до стисненого резистора (1), робочого резистора (2) та

компенсаційних тензорезисторів підключалася реєстраційна апаратура за допомогою монтажних дротів, і починалося вимірювання. В експерименті завантажували балку, навішуючи на неї по 1 кг гирь.

Крок завантаження балки спостерігався по стабілізації напруження згідно графіку, що будувався і відображався на екрані вимірювальної апаратури. Переконавшись, що напруження на графіку в якійсь мірі стабілізувалося, навантажували балку наступною гирею. Після навантаження 7 кг гирей близько 5 хвилин спостерігали за стабілізацією показань напружень на графіку. Після почали розвантажувати балку, знімаючи з неї по 1 кг вагових гирь. Крок розвантаження балки спостерігали по стабілізації напружень на графіку, що будувався та відображався на екрані вимірювальної апаратури.



Рис. 5.3 – Експериментальна балка з наклеїними тензорезисторами

Графіки запису показів вимірювання стисненого тензорезистора (1) наведено на рис. 5.4, а робочого 2) - на рис. 5.5 графіків видно, що обидва тензорезистора при завантаженні балки показують розтягнення, стиснений тензорезистор наближається до нуля, а робочий - до мінусових позначок ($\sigma_{\max} \approx -570 \text{ кг/см}^2$). При розвантаженні балки обидва тензорезистора показують стиснення, причому стиснений тензорезистр наближається до високих позначок ($\sigma_{\max} \approx 570 \text{ кг/см}^2$), а робочий - до нуля.

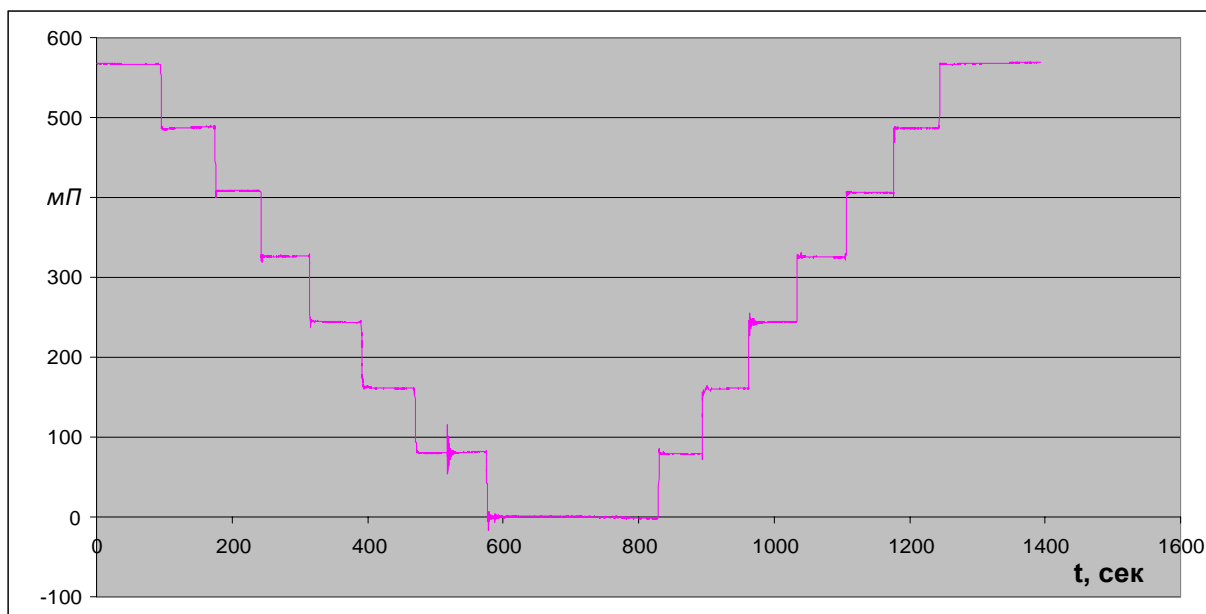


Рис. 5.4 - Графік зміни напружень згідно показів стиснутого тензорезистора (1)

Вимірювання, здійснені робочим тензорезистором (2), є стандартними вимірюваннями, тобто ненавантажену балку завантажили, виміряли напруження, що з'явилися від гирь і отримали відповідні графіки. Але тут не були враховані напруження балки, які вона мала до навантаження гирями.

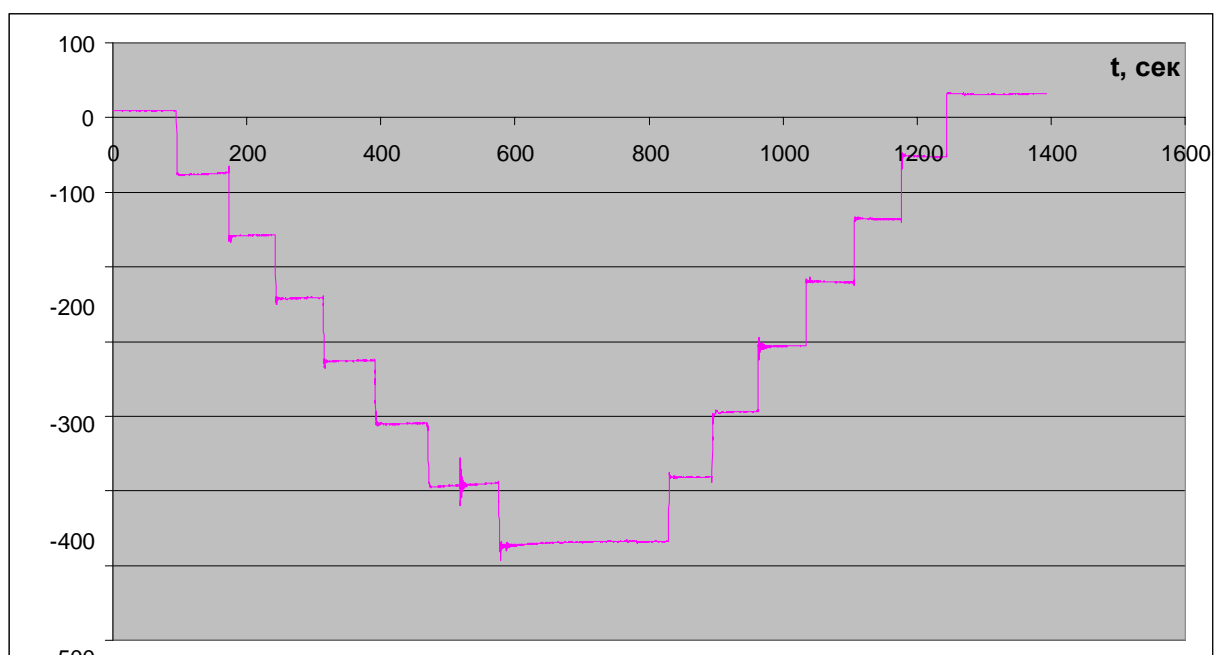


Рис. 5.5 - Графік зміни напружень згідно показів робочого тензорезистора (2)

Вже наявні напруження в балці визначаються наступним чином: припустимо, що ми не знаємо, наскільки навантажена балка (гирі загальною масою 7 кг), і вона є навантаженим елементом конструкції, де потрібно визначити величину напруження. Оскільки тензорезистор (1) був наклеєний на заздалегідь навантажену балку, після розвантаження балки на екрані вимірювальної апаратури він показував стиснення. Ця величина напруження від стиснення відповідає вже наявному напруженню в даній балці. На рис. 5.3 видно, що до першого навантаження 1 кг покази тензорезистора (1) перебували на позначці $\sigma \approx 570 \text{ кг / см}^2$, з кожним новим навантаженням напруження наближалось до нуля, а після повного завантаження (7 кг) тензорезистор (1) показував, що в балці напруження дорівнює нулю. Після розвантаження покази тензорезистора (1) знову наблизились до позначки $\sigma \approx 570 \text{ кг / см}^2$. В даному випадку відмітка $\sigma \approx 570 \text{ кг / см}^2$ є вже наявним напруженням в експериментальній балці.

Для реалізації на практиці запропонованого тензорезисторного способу вимірювання тиску в елементах конструкцій є кілька проблем. До них відносяться: пошук еталонного зразка, недостатня база вимірювання тензорезисторів, яка має обмеження по довжині і не дозволяє охопити всю вимірювану довжину елемента конструкції [136].

5.2. Експериментальні дослідження запропонованого способу вимірювання напружень

До вище перерахованим вимогам з відомих методів і засобів тензометрії найбільшою мірою відповідає метод резистивної тензометрії, що використовує в якості первинних засобів тензоперетворювачі активного опору або тензорезистори [137].

На даний час відомо чимало способів і методів використання тензорезисторів для вимірювання напружень в конструкціях і матеріалах (див. Розділ 1). Нами запропонований спосіб вимірювання навантажень [66, 68], який відрізняється від інших тим, що дозволяє розширити область застосування тензорезисторів для вимірювання деформацій і напружень в навантажених елементах конструкцій.

Запропонований спосіб вимірювання напружень в навантажених елементах конструкцій, наприклад, навантаженої металевої балки проводиться наступним чином. По-перше, знімаються покази індикаторних приладів ще не заклеєного тонкого листа з електронепровідного матеріалу з наклеєними заздалегідь тензорезисторами.

Після цього на поверхню випробуваної навантаженої металевої балки наклеюється цей тонкий лист з електронепровідного матеріалу із заздалегідь наклеєними тензорезисторами. В результаті цього в тензорезисторах змінюються омичні опори, які фіксуються індикаторним приладом.

За різницею показів індикаторних приладів визначається величина напруження в навантаженій металевій балці до і після наклеювання тонкого листа. Потім за допомогою закону Гука визначається напруження в навантаженій металевій балці.

Для дослідження даного способу вимірювання навантаження в навантажених елементах конструкцій був проведений експеримент, для якого нами була обрана сталева балка рівного опору (рис. 5.1).

Випробування зразка проводилися за допомогою експериментальної механічної установки, на якій здійснювався вигин балки за допомогою поступового навантаження. Проводилися статичні випробування.

В експерименті застосовано тензорезистор загального призначення. Реєстрація даних в ході випробувань і обробка отриманої інформації здійснювалися за допомогою розробленої нами приладової системи (рис.5.2). для того, щоб апаратура під час вимірювання могла вловити малі величини напружень в цій конструкції при їх вимірюванні, для виключення дрейфів від

різних явищ було прийнято рішення вимірювати напруження в балці двома каналами: опорним і робочим (підключення двох тензорезисторів). Для реєстрації омичного опору тензорезистора при його живленні змінним або постійним струмом було застосовано схему моста Уїтстона при вимірюванні деформації вигину.

Особливість експерименту полягала у тому що, тензорезистор (1) клеївся на звичайний машинописний папір рівного розміру, і процес сушіння здійснювався згідно стандартів наклеювання (12 годин). Далі тензорезистор підключався до реєструючої апаратури за допомогою монтажних дротів і починалося вимірювання. Вимірювальний процес тривав 25 хвилин. Графік зміни напружень цього вимірювання показаний на рис. 5.6 [136].

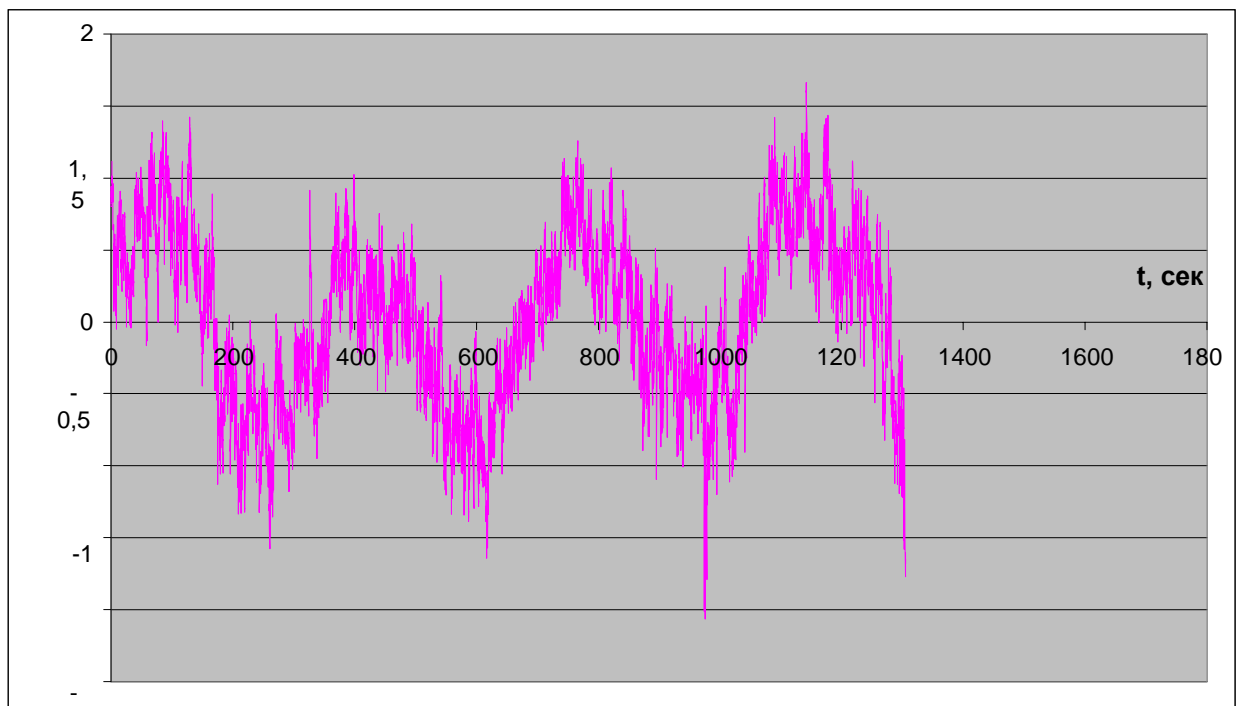


Рис. 5.6 - Графік зміни напружень на основі показів даних тензорезистора (1)

Далі на експериментальну балку рівного опору розмірами 305 мм х 49 мм х 17,5 мм х $t = 6,8$ мм клеївся машинописний папір, на який було наклеєно тензорезистор (1) від попереднього вимірювання (назвемо його умовно тензорезистор (2)). Клей тензорезистора осушувався за всіма

стандартами наклеювання тензорезисторів. Через 12 годин після наклеювання до тензорезистора підключалася апаратура і починалося вимірювання. В експерименті навантажували балку по 1 кг (загальна вага 7 кг, що, приблизно, еквівалентно $\sigma = 570 \dots 590 \text{ кг / см}^2$), розвантаження балки здійснювалося теж поступово по 1 кг.

Вимірювальний процес тривав також, як і в попередньому вимірюванні, 25 хвилин.

За планом експерименту почали навантажувати балку, навантажуючи її по 1 кг гирями. Крок навантаження балки спостерігали по стабілізації напруження на графіку, що відображався на екрані вимірювальної апаратури. Переконавшись що, напруження на графіку вдалося, в певній мірі, стабілізувати, навантажували наступний кілограм. Після навантаження 7 кг близько 5 хвилин спостерігали за стабілізацією показів напружень на графіку. Потім, аналогічно попередньому експерименту, відбувалося розвантаження балки, знімаючи з неї по 1 кг гирь. Графік зміни напружень, записаний тензорезистором (2), показаний на рис. 5.7.

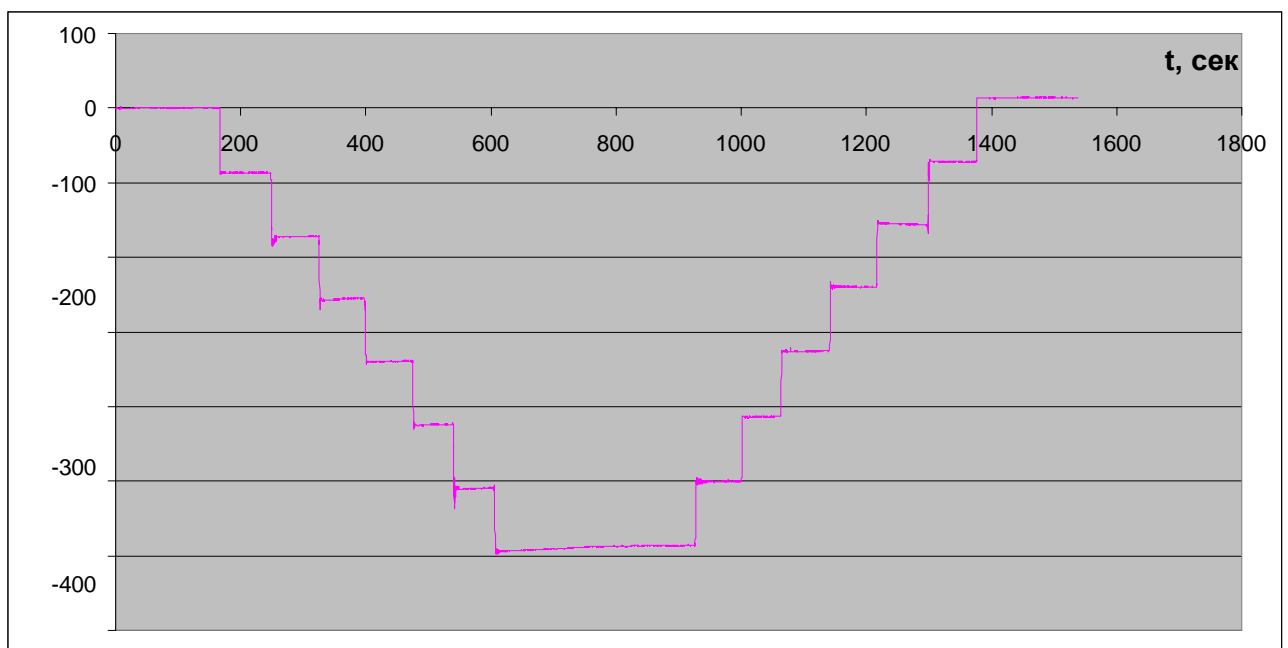


Рис. 5.7 - Графік зміни напружень згідно показів тензорезистора (2)

З графіку на рис. 5.5 видно, що покази тензорезистора (1), наклеєного на машинописний папір, змінюються за певною амплітудою і варіюють в межах $\sigma \approx \pm 2 \text{ кг/см}^2$. Ця зміна пов'язана з уловлюванням дрейфів на вимірювальному каналі.

Що стосується другого вимірювання, то тут покази тензорезистора (2) при навантаженні балки показує розтяг (рис. 5.7), і падає до мінусових позначок ($\sigma_{\max} \approx -600 \text{ кг/см}^2$), а при розвантаженні балки тензорезистор (2) показує стиснення і падає до нуля. Ці результати показали, що тензорезистор, наклеєний на папір, сприймає зміни напружень (розтяг, стиск) в експериментальній балці. Хоча, для отримання більш ясних результатів, ми використовували завантаження ваговими гирями. Таким способом можна вимірювати напруження в навантажених елементах конструкцій, коли неможливо знайти ненавантажений еталонний зразок виробу.

Даний метод може бути застосований при вимірюванні механічних напружень в елементах конструкцій, що застосовуються в машинобудівній, будівельній та інших галузях промисловості [136].

5.3 Експериментальні дослідження електромагнітним методом при вимірюванні напружень в металевих конструкціях

Відомо, що при посиленні елементів металевих конструкцій виробляються попередні розрахунки, встановлюються розміри поперечного перерізу елементів, які в подальшому будуть використані для посилення елементів металевих конструкцій. Як би точно не проектувалося посилення елементів металевих конструкцій, потрібно їх перевірити будь-яким експериментальним методом. У зв'язку з ринковою економікою необхідно проводити посилення в потрібний момент і в потрібних місцях, з метою запобігання можливих аварій і катастроф, а також для економії державних коштів.

Самою достовірною інформацією про ефективність вжитих заходів щодо посилення елементів металевих конструкцій гідротехнічних споруд є величина напружень в посиленних елементах конструкцій. Вимірювання напруг в елементах посилення металевих конструкцій можуть виявити в деяких випадках, допущені недоробки на стадії проектування і виготовлення, а також при експлуатації. Вимірювання напруг в елементах металевих конструкцій проводяться різними руйнівними методами [56-58], що дають достовірну інформацію про напружений стан елементів металевих конструкцій. Разом з тим, при дослідженні застосовуються не руйнівні методи, серед них електромагнітні методи вимірювання тиску [59, 60].

При оцінці ефективності посилення елементів металевих конструкцій електромагнітним методом приймаються наступні припущення:

- зміни магнітних властивостей елементів посилення металевих конструкцій при виконанні технологічних операції щодо посилення незначні або ними можна знехтувати;
- зміна напруженого стану порівняно невеликого обсягу матеріалу, який виділяється з елемента конструкцій для встановлення тарировочної залежності між напругою і зміною магнітних властивостей матеріалу конструкції не істотні;
- магнітно-пружні властивості матеріалу посилення металевих конструкцій зберігаються постійними.

Вимірювання напруг електромагнітним методом при посиленні металевих конструкцій 1 можна здійснювати відомим перетворювачем (рис. 5.8), що складається з П-образного сталевого сердечника 2, що має намагнічуючі 3 і вимірювальні 4 обмотки, використовуючи вимірювальну систему наведеної на рис. 5.8 і іншими відомими електромагнітними перетворювачами [34, 61].

Зокрема, необхідною умовою є експериментальна перевірка достовірності результатів математичного моделювання і працездатності

пропонованої структури напівпровідникового тензоперетворювача, яка проводилася при постійній температурі за схемою, представленої на рис. 5.8.

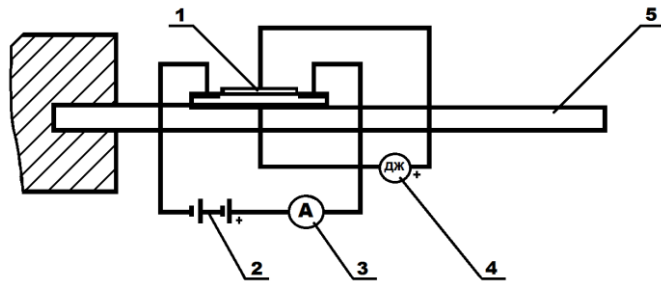


Рис. 5.8 – Макет для проведення експерименту:

1 - тензоперетворювач; 2 - джерело постійного струму;
3 - мікроамперметр; 4 - регульоване джерело живлення; 5 - консольна балка

Враховуючи те, що для дослідження зразки тензоперетворювача закріплювалися на консольній балці постійного перетину, виконаної з діелектричного матеріалу. Один кінець балки був жорстко закріплений, а до вільного кінця балки прикладалася навантаження, яка визначає деформацію тензоперетворювача. Довга сторона зразків орієнтувалася уздовж осі балки.

Необхідно зауважити, що величина механічного напруження, яка виникає при деформації в місці установки тензоперетворювача, визначалася за відомим з експериментальної механіки виразом [59, 61, 62]:

$$X = C_1 \varepsilon = \frac{3C_1 a h}{2b^3} l, \quad (5.1)$$

де a – відстань від центру зразка до вільного кінця балки; h – товщина балки; b – довжина балки; l – величина вигину у вертикальному напрямку; C_1 – модуль пружності матеріалу балки.

Враховуючи те, що експериментальні дослідження, проведені при різних напруженнях на виході напівпровідникового тензоперетворювача і на керуючому електроді, підтвердили адекватність математичної моделі і

ефективність створеної методики розробки напівпровідникових тензоперетворювачів.

У результаті проведеного аналізу похибок було виявлено домінуючі фактори, що роблять основний вплив на похибку вихідного сигналу тензоперетворювача. Розрахована наведена похибка вимірювань тензоперетворювача, виготовленого за сучасними інтегральним технологіям, складова не більше 0,5% [54, 59, 62].

Крім того, розроблено кілька варіантів конструкцій інтегральних напівпровідникових тензоперетворювачів.

Один з варіантів являє собою розділення ячейки, нанесені на гнучку основу. Кожна ячейка являє собою напівпровідниковий тензочутливий елемент. Міжз'єднання виконуються в плівковому варіанті. Дане конструктивне рішення дозволяє визначати деформації в деталях і конструкціях складної геометричної форми з нерівною поверхнею.

Другий варіант інтегрального тензоперетворювача представляє кремнієву мембрану, на поверхні якої сформовано чотири напівпровідникових тензоперетворювача, об'єднаних в мостову схему металізацією. Кремнієва мембрана встановлюється на діелектричну підкладку і поміщається в металевий корпус. Застосування керованих елементів у складі тензоперетворювача дозволяє спростити процедуру настройки, підвищити надійність і точність балансування тензосхеми.

Слід зазначити, що розташування напівпровідникових тензоперетворювачів на кремнієвій мембрані може бути змінено в залежності від необхідної чутливості, точності, робочого діапазону вимірюваних величин.

Проведено інформаційний аналіз вживаних в даний час тензоперетворювачів, що підтвердив актуальність розробки елементів на основі нових напівпровідникових матеріалів і структур, що дозволяють поліпшити метрологічні характеристики існуючих систем матеріалів [59-62].

Досліджено вплив деформації на основні параметри структур, виконаних на різних напівпровідниках та виявлено можливості їх використання в якості тензоперетворювача. На основі результатів досліджень математичної моделі створена методика розробки напівпровідникових тензоперетворювачів, що дозволяє прогнозувати метрологічні характеристики на етапі проектування.

Таким чином, згідно отриманих результатів, необхідно розробити напівпровідниковий тензоперетворювач, що містить на поверхні монокристала кремнію *n*-типу провідності діелектричний шар двоокису кремнію, а також ізольований електрод, що дозволяє підвищити чутливість і точність визначення параметрів матеріалів і виробів.

Отже, застосування керованих тензочутливих елементів у складі тензоперетворювачів дозволяє спростити процедуру настройки, підвищити надійність і точність балансування тензосхеми.

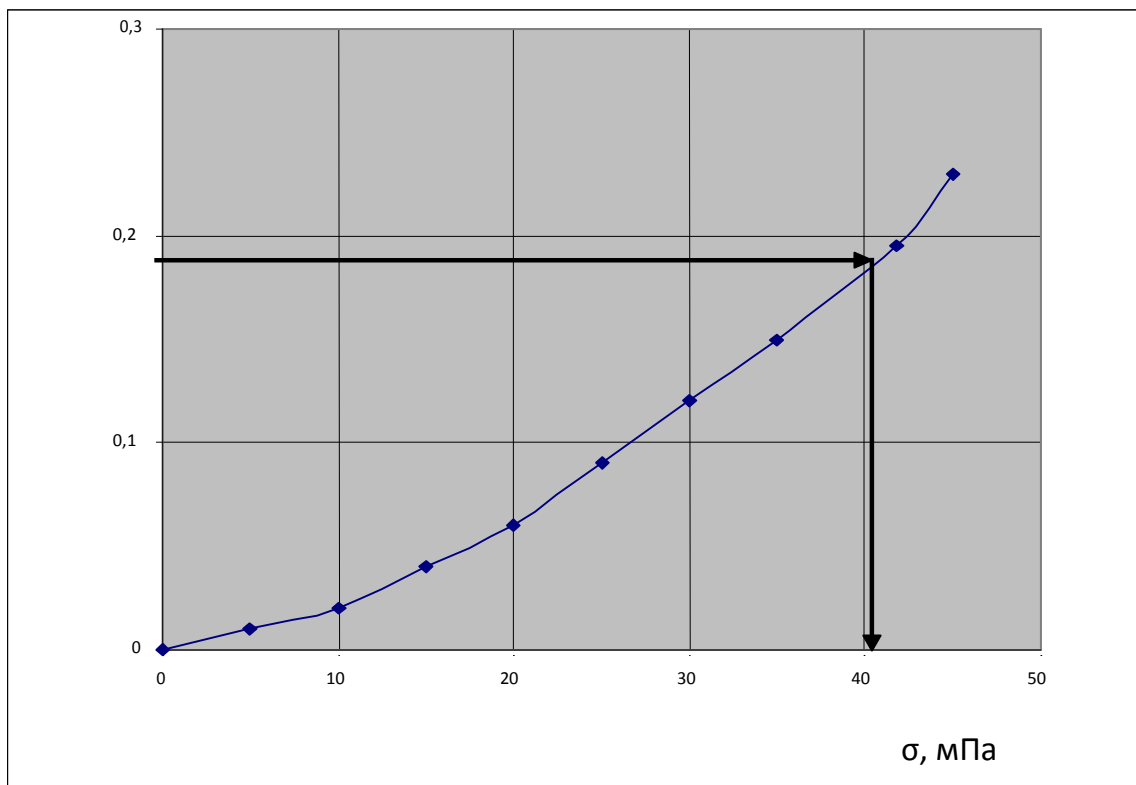


Рис. 5.9 - Тарувальна крива для визначення напружень в елементах металевих конструкцій: вісь абсцис - напруга, мПа;
вісь ординат - відносна зміна площі магнітних властивостей

Для тарувального випробування використовувалися тарувальні балки, які завантажуються ваговими гирями. В якості перетворювачів використані П-образні магнітопроводи, що мають намагнічувальні та вимірювальні обмотки. Довжина магнітопроводу 25 мм, ширина 5 мм. Результати тарувального випробування наведені на рис. 5.9.

Експериментальні дослідження проведені на тарувальних балках після посилення. Для посилення балок використовувалися листові сталі, вирізані за розміром тарировочної балки товщиною 2 мм. Результати вимірювання тиску наведені на рис. 5.10.

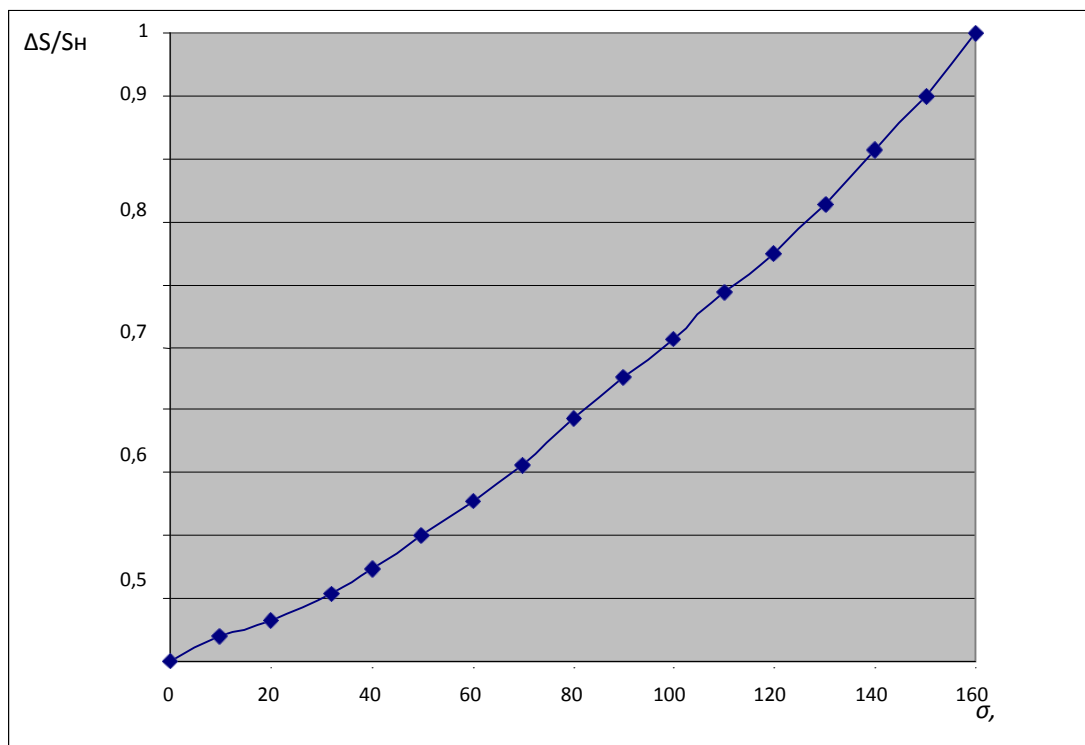


Рис. 5.10 - Визначення напружень в елементах металевих конструкцій за тарувальною кривою

Для визначення напружень спочатку зняли кругову діаграму на незавантаженому зразку, після посилення тарувальної балки і після її завантаження зняли кругову діаграму за допомогою магнітопроводу і вимірювальної системи. Вольтамперна характеристика першого тарувального випробування і випробування після завантаження залишалися незмінними.

Порівнюючи площі кругових діаграм зміни магнітних характеристик випробуваного елемента, встановили величину відносної зміни площ, яка дорівнювала $\Delta S / S_n = 0,185$. За тарувальною кривою проводимо горизонтальну лінію паралельну до осі абсцис до перетину з тарувальною кривою, а потім опускаємо перпендикуляр до осі абсцис.

Результати експерименту показали, що напруження в посиленій балці дорівнювало 40,75 мПа. Теоретичне значення напруження дорівнювало 41,8 мПа. Абсолютна похибка - 1,05 мПа, відносна похибка становить - 2,51%. Таким чином, отримане значення напружень в посилених елементах металевих конструкцій показує високу точність вимірювальної системи. Відхилення пояснюється похибкою, як вимірювальної системи, так і в процесах обчислення [62].

5.4. Експериментальні дослідження методом FBG складних металевих конструкцій

Також були проведені дослідження щодо вимірювання та моніторингу динамічних пошкоджень конструкцій за допомогою датчиків FBG [30].

У цьому дослідженні була запропонована система вимірювання напружень за допомогою датчиків FBG, що встановлені на складній металевій конструкції (рис. 5.11). Такий тип конструкції широко використовується в машинобудівній, будівельній, транспортній галузях тощо. Датчики FBG розміщені на найбільш вразливих місцях - зварних металевих з'єднаннях та зварних з'єднаннях з ребрами конструкції. Складові напружень, спричинені динамічними навантаженнями та зміною температури, отримуємо за допомогою аналізу напружень багатороздільної здатності. Крім того, множинна статистична характеристика спектру напружень моделюється за допомогою методу імовірнісного розподілу та запропонованого підходу до оцінки параметрів, заснованих на так званому генетичному алгоритмі (ГА). Оптимальний розподіл досягається

байєсівським інформаційним критерієм (БІК). Крім того, напруження зварного з'єднання обчислюється методом екстраполяції згідно рекомендацій Інституту зварювання [131], а також з врахуванням стохастичної природи коефіцієнта концентрації напруження (ККН).

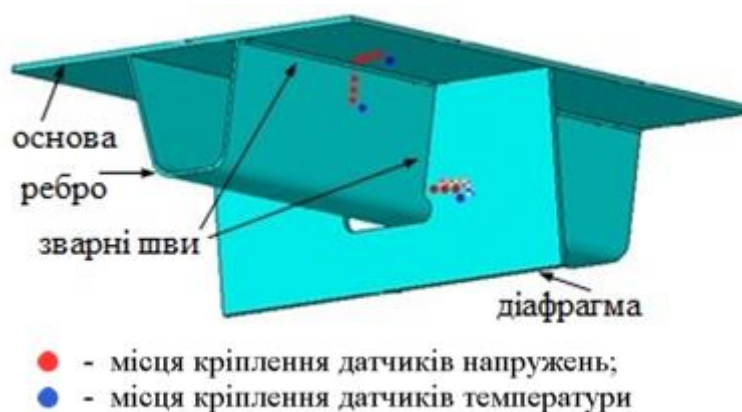


Рис. 5.11 – Схема розміщення датчиків FBG для вимірювання напружень на складній металевій конструкції

Експериментальний аналіз напружень здійснювався на основі вимірювань деформації з використанням тензорезисторів. У порівнянні з традиційними механічними та електричними датчиками датчики оптичних волокон мають деякі унікальні переваги, і тому вони набувають широкого застосування для моніторингу інженерних конструкцій у всьому світі.

Датчик оптичних волокон складається з світлопередавача, приймача, оптичного волокна, модуляторного елемента та блоку обробки сигналу. Як основна частина датчика оптичного волокна, саме оптичне волокно може виступати в якості чутливого елемента або переносити світло від джерела до елемента модулятора, який зазвичай виготовляється з силікатного скла або полімерного матеріалу. Відповідно до зміни відстані решітки, датчик оптичного волокна модулює світло і відбиває оптичний сигнал в аналітичну одиницю для отримання відповідної фізичної кількості структури [75].

У цьому дослідженні система вимірювання на базі FBG складається з датчиків FBG, волокон передачі та приладової системи. Всього 16 областей

вимірювання (для кожної області вона складається з трьох точок вимірювання деформації та однієї точки - компенсації температури) на критичних зварних з'єднаннях. Місце установки датчиків FBG проілюстровано на рис.5.12: по чотири датчики FBG встановлені на кожній вимірювальній площі основи, U-ребра та поперечної діафрагми.

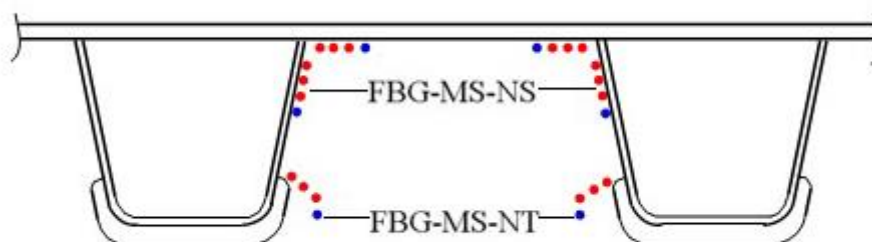


Рис. 5.12 – Схематичне зображення поперечного перерізу конструкції та місць розташування датчиків FBG

У цьому дослідженні області вимірювань є відносно вузькі, і нам потрібно встановити три датчики FBG довжиною 15 мм для фіксації значень напружень в місцях, розташованих на відстані 5 мм, 15 мм і 20 мм від ступки шва. Дана область решітки спричинятиме відбивну здатність датчиків FBG, що становить понад 85%. Довжина хвилі центрального відображення датчиків FBG знаходиться в діапазоні від 1526 нм до 1561 нм. У цьому дослідженні використовується вимірювальний модуль із 16 каналами, причому до кожного каналу підключено по чотири датчики FBG.

Для приладової системи ефективність даних вимірювання повинна бути вивчена та перевірена відповідно до тенденції зміни даних. У цьому дослідженні приладова система, що базується на методі FBG, налічує датчики температури FBG-MS-NT та датчики напруження FBG-MS-NS, що розташовані на відстані 15 мм від зварного з'єднання, а датчики FBG-MS-NT розташовані близько до датчиків FBG-MS-NS, як показано на рис. 5.12.

Довжина хвилі Брега $\Delta\lambda_B$ визначатимемо на основі рівняння [132]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \{(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_e) \Delta\varepsilon\}, \quad (5.2)$$

де $\Delta\varepsilon$ - зміна деформації, ΔT - зміна температури, α - коефіцієнт теплового розширення, ξ - термооптичний коефіцієнт, p_e - деформаційно-оптичний коефіцієнт.

У даному дослідженні відповідно до отриманих значень показів датчиків та зміни довжини хвилі Брега за допомогою вимірювального модуля приладової системи може бути отримана інформація щодо зміни температури та зміни деформації. З графіка а) рис. 5.13 видно, що за добу температура поверхні досліджуваної конструкції коливається приблизно в межах від 13 °C до 24 °C, а тенденція зміни напруження є досить схожою з температурою (графік б)). Можна зробити висновок, що викликане температурою напруження займає значну частку загального напруження. Діапазони напружень вибраного зварного з'єднання становлять менше 5 МПа, які, в основному, спричинені динамічними навантаженнями навколишнього середовища.

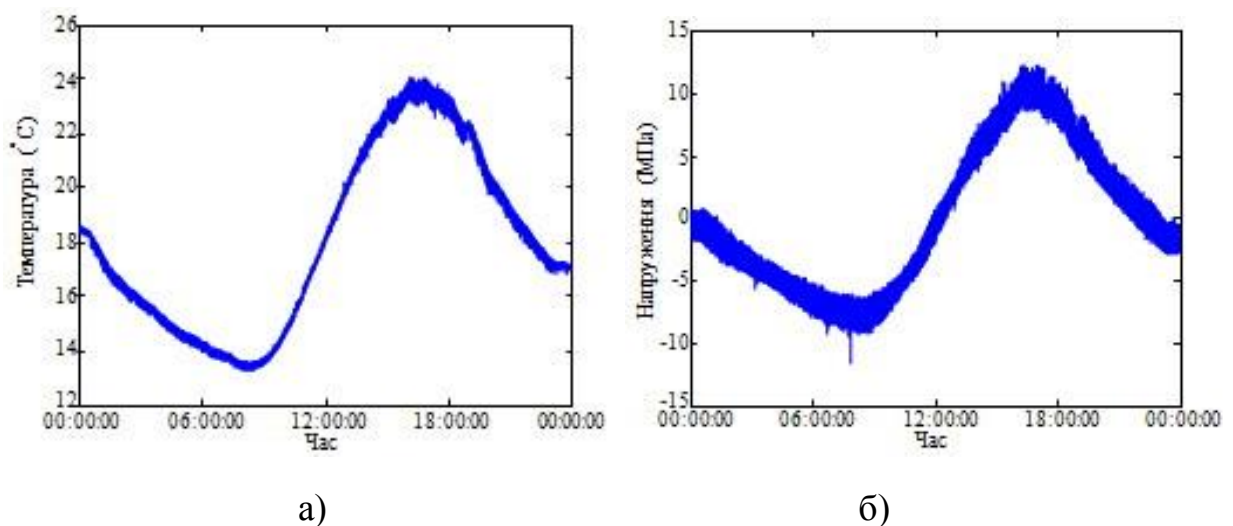


Рис. 5.13 – Графіки зміни температури (а) та напруження (б) у часі для досліджуваної конструкції у ненавантаженому стані

Під час динамічних навантажень тенденція зміни також досить схожа на температуру поверхні, як показано на рис. 5.14. Спектр напружень для періоду імітації експлуатаційних динамічних навантажень демонструє мультимодальну характеристику, що містить компоненти напруження, що індукуються динамічними навантаженнями навколишнього середовища та експлуатаційними динамічними навантаженнями.

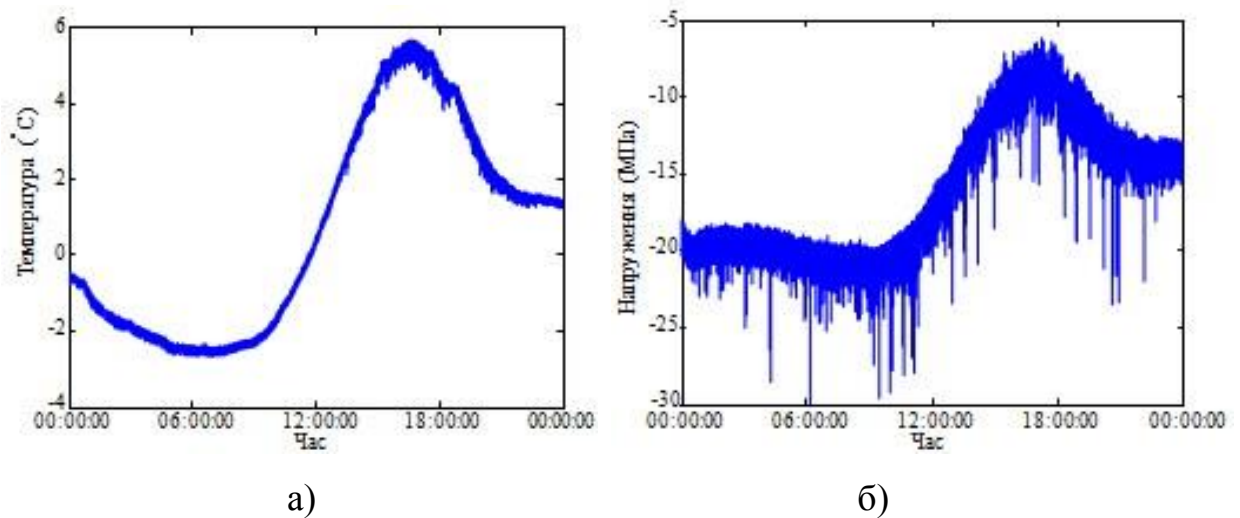
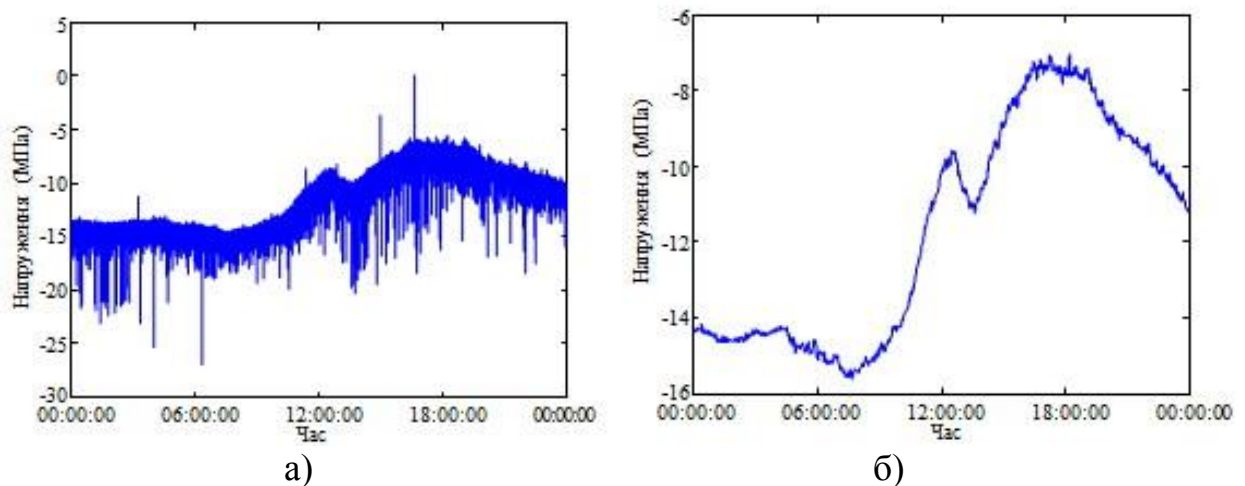


Рис. 5.14 – Графіки зміни температури (а) та напруження (б) у часі для досліджуваної конструкції у навантаженому стані

Загалом, дані вимірювання напруження від час динамічного навантаження конструкції, що отримані за допомогою встановлених датчиків, розміщених в певному місці конструкції, складаються з компонентів, що спричиняють динаміку зміни навантаження та температури. Як описано в літературі [176], існують трендові інградієнти (низькочастотні компоненти) в часових періодах напруження, які можна віднести до впливу щоденного циклу зміни температури. Для того, щоб вивчити відсоток напружень, спричинених різними видами навантаження, такими як навантаження та температура, було застосовано Wavelet-аналіз багатороздільної здатності для розкладу необроблених даних на високочастотні та низькочастотні компоненти. Wavelet-аналіз мультимодальної здатності дозволяє розкласти сигнал на різні шкали

роздільної здатності: дані з грубою роздільною здатністю містять інформацію про низькочастотні компоненти, а дані з більш чутливою роздільною здатністю містять інформацію про високочастотні компоненти [176-184]. Отримані й оброблені деформаційні сигнали можуть бути розкладені на високочастотні та низькочастотні компоненти на різних рівнях. Для кожного рівня високочастотна частина компоненти відокремлюється, а решта низькочастотної частини компоненти (апроксимації) переноситься на наступний рівень декомпозиції. Завдяки Wavelet-аналізу з роздільною здатністю, деформаційний компонент, який можна віднести до температурного впливу, може бути отриманий з частини найнижчої частоти в області перетворення Wavelet.

Рис. 5.15 та в додатку Е ілюструють розкладені у часі Wavelet напружень для вибраних датчиків деформації FBG. У цих часових періодах низькочастотні компоненти 12-рівневого розкладу даних про напруження являють собою реконструйовані напруження, викликані температурою. Порівняльний аналіз між початковими напруженнями та напруженнями, що викликаються температурою, показує, що часові періоди напруженості, спричинені температурою, мають однакову тенденцію зміни та періодичну



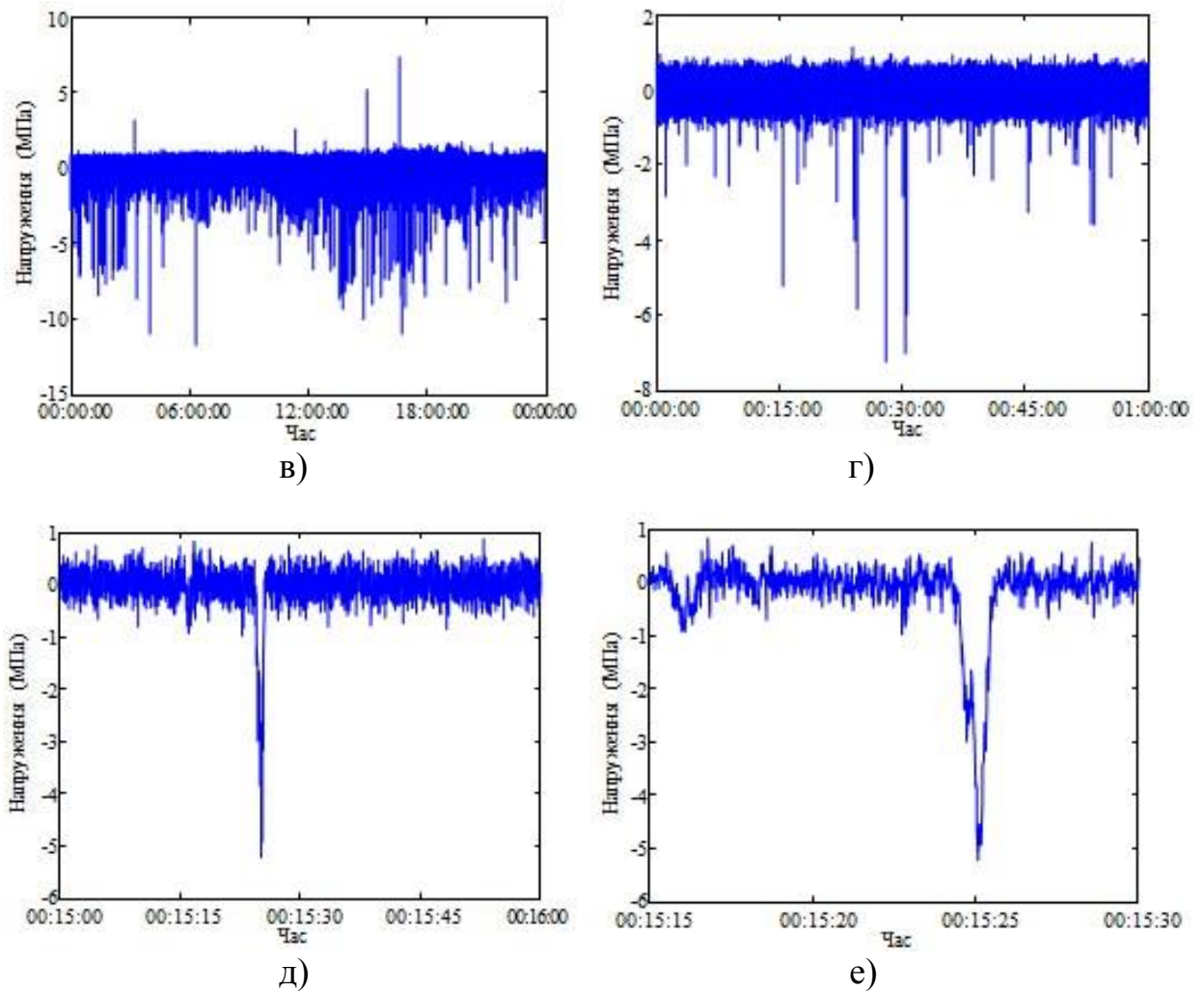


Рис. 5.15 – Графіки зміни напруження у часі для досліджуваної конструкції за умов:

а) - без врахування динамічного навантаження; б) - з врахуванням температурних змін; в) - з врахуванням динамічного навантаження; г) - з врахуванням динамічного навантаження за 1 год; д) - з врахуванням динамічного навантаження за 1 хв; е) - з врахуванням динамічного навантаження впродовж 15 с.

характеристику за один день. Напруження, викликане температурою, займає основну частину загального напруження, що вказує на те, що основна зміна напруження на початковому етапі експлуатації конструкції викликається температурним впливом.

На рис. 5.15 та в додатку Е також показано, що високочастотні компоненти 12-розрядного розкладання даних про напруження, індуквані навантаженням. Історії напружень, індуквані навантаженням, представлені

в різні масштаби часу (1 день, 1 год, 1 хв і 15 с), щоб показати характер сигналу.

5.4.1. Імовірнісне моделювання напружено-деформованого стану

Спектр напружень представляє мультимодальну характеристику, а його функція щільності розподілу імовірностей (ЩРІ) може бути виражена у вигляді зваженої суми різних функцій ЩРІ. Модель кінцевої функції розподілу імовірностей є комбінацією двох або більше ЩРІ і, зазвичай, застосовується для моделювання складних розподілів імовірностей [195]. На основі обмеженого набору ЩРІ $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ і відповідні величини ваги w_1, w_2, \dots, w_n яких більше нуля, а сума дорівнює одиниці, основну структуру функції кінцевого розподілу ЩРІ можна записати так:

$$f(x|n, w, \theta) = \sum_{l=1}^n w_l f_l(x|\theta_l), \quad (5.3)$$

де $f(x|n, w, \theta)$ - цільова ЩРІ; $f_l(x|\theta_l)$ - задана параметрична функція інтелектуальних компонент ЩРІ. Орієнтовні параметри моделювання ЩРІ для спектру напружень включають кількість компонентів або груп n , вагу компонентів ЩРІ w_l та параметри кожного компонента θ_l .

У цьому дослідженні розглядається три основні функції ЩРІ як прогнозовані кінцеві функції розподілу, а саме функції: нормального розподілу, логнормального розподілу та розподілу Вейбулла. Ці розподіли можна виразити наступним чином:

- функція нормального розподілу:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(x - \mu_l)^2}{\sigma_l^2} \right\}, \quad (5.4)$$

- функція логнормального розподілу:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_l x}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(\ln(x) - \mu_l)^2}{\sigma_l^2}\right\}, \quad (5.5)$$

- функція розподілу Вейбулла:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l \frac{\gamma_l}{\eta_l} \left(\frac{x}{\eta_l}\right)^{\gamma_l-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta_l}\right)^{\gamma_l}\right\}, \quad (5.6)$$

де μ_l та σ_l - параметри середніх значень та стандартних відхилень у нормальних та логнормальних розподілах; γ_l і η_l - параметр форми та параметр масштабу розподілу Вейбулла.

Невідомі параметри в моделях ЩРІ визначатимуться запропонованим методом оцінки параметрів на основі генетичного алгоритму (ГА).

ГА, запропонований в 1975р. [196], є стохастичним алгоритмом вирішення проблем оптимізації, який широко застосовується для вирішення різноманітних проблем в галузях, що включають математику, цивільне будівництво, космонавтику тощо [196].

ГА - це процес оптимізації, який здійснюється шляхом вибору та модифікації окремих рішень для послідовного підходу до оптимального рішення. Цей процес оптимізації схожий з теорією еволюції. Як і особливість біологічної еволюції, ГА також має перевагу, що дозволяє їй шукати глобальну зону та запобігати її падінню до локального оптимуму. Таким чином, ГА особливо підходить для складної та великої розмірної оптимізації, і вона може забезпечити точні результати та менший час обчислення в оцінці параметрів кінцевої функції ЩРІ.

Встановлення найбільш оптимальної функції T є найважливішою частиною ГА. Якщо припустити, що ми маємо дані $x=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$, очевидно, що чим ближче між моделлю та вимірюваним розподілом даних, тим більше значення функції максимальної імовірності. Таким чином, наступне рівняння використовується як умова для оптимальної функції:

$$T=f(x|\theta)=f(x_1|\theta) \times f(x_2|\theta) \times \dots \times f(x_n|\theta), \quad (5.7)$$

Щоб врахувати, чи відповідають спектри напружень вибраним моделям статистичного розподілу, дані моделі розподілу з різними компонентами необхідно порівнювати та вибирати, виходячи з відповідних показників. Тому у даному дослідженні було застосовано Байєсівський критерій інформації (БКІ), що використовується для визначення кількості компонентів та вибору оптимальної моделі спектру напружень.

БКІ був розроблений відомим німецьким ученим Шварцом, котрий базується на ймовірності функції [198], яку, зазвичай визначають, як:

$$BKI=\ln(n)k - 2\ln(L), \quad (5.8)$$

де L - максимальне значення функції ймовірності для моделей; k - відхилення, яке є кількісною оцінкою параметрів у моделі; n - кількість точок даних у x .

Переважатиме та модель, у якій значенням БКІ буде найнижчим.

Для проведення аналізу імовірнісного моделювання використано дані показів датчика напружень FBG.

Для моделювання кінцевої функції ЩРІ та кумулятивної щільності розподілу (КЩР) для даних діапазону напружень використовуються три види кінцевих функцій ЩРІ (нормальна, логнормальна та Вейбулла). Відповідні розрахункові параметри різних моделей розподілу кінцевих функцій

обчислюються запропонованим методом оцінки параметрів на основі ГА. Оптимальну модель вибирають відповідно до значень БКІ.

На рис. 5.16 показано динаміку значень БКІ з різною кількістю компонентів для трьох моделей ЦРІ.

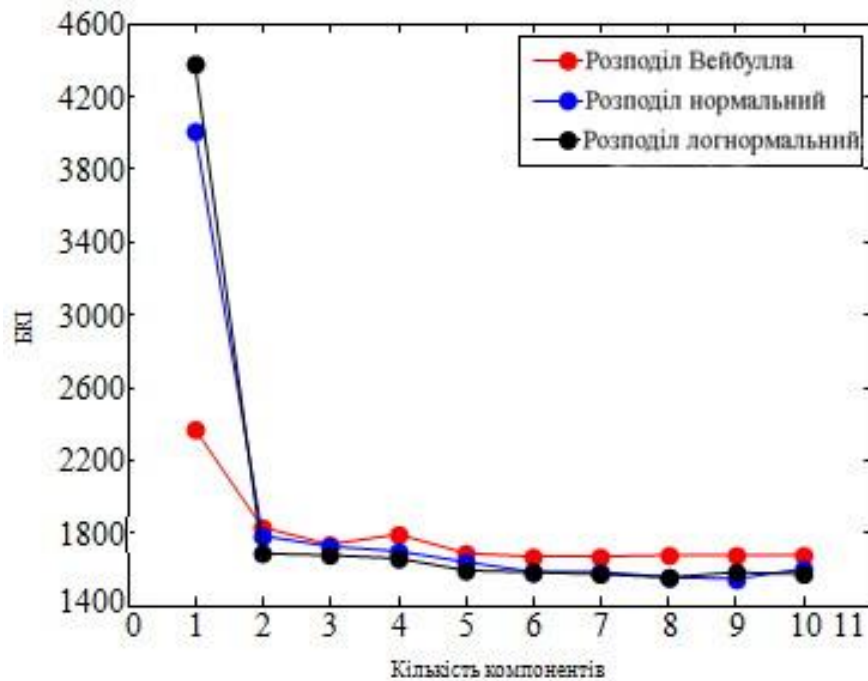


Рис. 5.16 – Графіки залежностей Байєсівського критерію інформації від кількості компонентів

На основі даних показів датчика FBG на рис. 5.17 наведено графіки залежності щільності розподілу імовірності (а) та кумулятивної щільності розподілу (б) від напруження для трьох функцій розподілу, а саме: нормального розподілу, логнормального розподілу та розподілу Вейбулла.

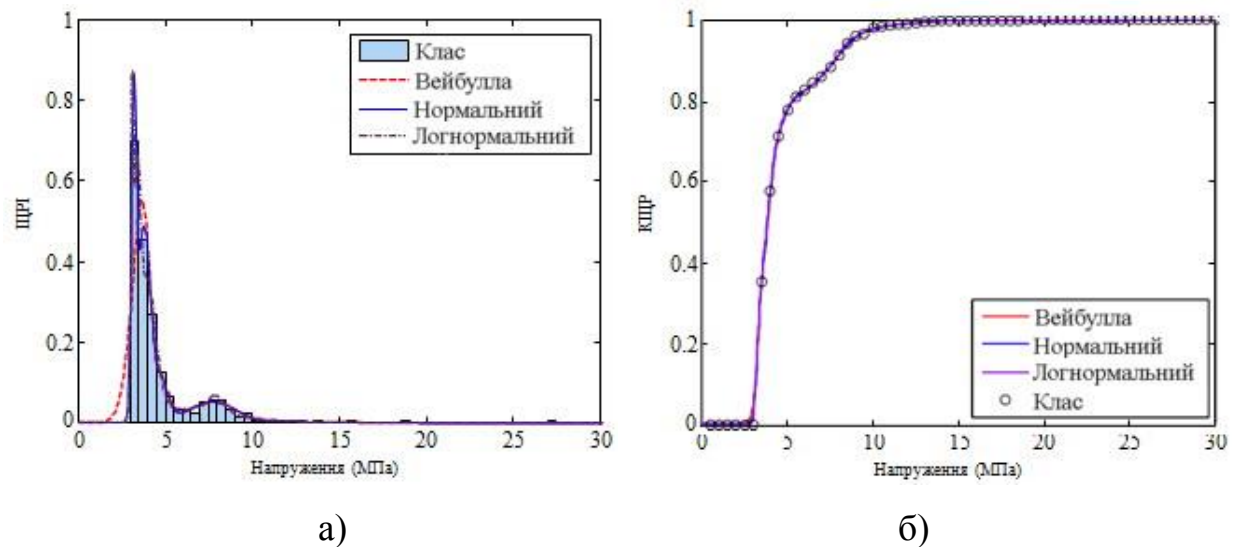


Рис. 5.17 – Графіки залежностей щільності розподілу імовірності (а) та кумулятивної щільності розподілу (б) від напруження

Відповідно до критерію відбору, найкраща модель розподілу діапазону напружень визначається за найменшим значенням БКІ. З рис. 5.16 встановлено, що значення БКІ для трьох моделей швидко сходяться у точці з двох компонентів. Розподіл функції Вейбулла досягає стабільності з п'ятьма компонентами, нормальний розподіл досягає стабільного значення з дев'ятьма компонентами, а логнормальний розподіл досягає стабільного значення з вісьмома компонентами. Серед трьох розподілів нормальний розподіл призводить до найнижчого значення БКІ, тому раціонально вибирати нормальний розподіл функції з дев'ятьма компонентами як оптимальний розподіл імовірності діапазону напружень. Орієнтовні параметри кожного розподілу компонентів наведено в таблиці 5.2.

Параметри оцінювання компонентів розподілу

Розподіл	Параметри оцінювання		
	Вага компонентів розподілу w_l	Середнє значення μ_l	Стандартне відхилення σ_l
Нормальний	0,18017	7,70356	1,37439
	0,40859	3,77575	0,34666
	0,26359	3,21300	0,14166
	0,00180	18,50252	$1,54 \cdot 10^{-7}$
	0,00180	27,02115	$9,11 \cdot 10^{-8}$
	0,00476	5,51921	0,00440
	0,12739	4,659781	0,45840
	0,00180	15,72309	$5,68 \cdot 10^{-7}$
	0,01005	12,36552	0,91614
Логнормальний	0,04765	2,07228	0,06052
	0,23927	1,22655	0,05268
	0,18456	1,94656	0,30865
	0,14179	1,13577	0,02487
	0,38311	1,39491	0,11173
	0,00179	2,91790	$4,16 \cdot 10^{-9}$
	0,00179	3,29662	$5,86 \cdot 10^{-7}$
	$4,58 \cdot 10^{-7}$	2,06963	1,48652
Вейбулла	0,00759	19,3709	2,92343
	0,63222	3,70731	8,32196
	0,02979	10,79137	4,81138
	0,16668	7,98040	6,24103
	0,16369	4,69135	8,37585

5.4.2 Статистичний аналіз концентрації напруження

Статистичний аналіз концентрації напруження у складній технічній конструкції ґрунтується на розрахунку коефіцієнта концентрації напруження (ККН), який визначатиметься як відношення напруження «гарячої» точки σ_{hot} до номінального напруження σ_{nom} . Тоді:

$$SCF = \frac{\sigma_{hot}}{\sigma_{nom}}, \quad (5.9)$$

Напруження у «гарячій» точці, що виникає внаслідок локальної концентрації напруження через геометричну нерівномірність та розрив на зварному з'єднанні, важко визначити через надзвичайно складний розподіл напруження безпосередньо в районі зварювального шва. Його, зазвичай, отримують за допомогою чисельних моделювань або експериментальних вимірювань. Згідно із рекомендаціями Інституту зварювання [198] зварні з'єднання можна класифікувати на три типи (а, b і с) відповідно до місця розташування «гарячого» місця та схеми зварювання. У цьому дослідженні вибирається зварне з'єднання, розташоване поруч із датчиком FBG-MS-NS, яке належить до типу b. Напруження в «гарячій» точці зварного з'єднання визначається, виходячи з напруження в місці розташування в 5 мм від зварювального шва, тобто $\sigma_{5\text{мм}}$ виміряне датчиком FBG і напруження в місці, що знаходиться в 15 мм від шва, $\sigma_{15\text{мм}}$.

Відповідно до методу екстраполяції типу b, його можна обчислити за допомогою [191]:

$$\sigma_{\text{hot}} = 1,5\sigma_{5\text{мм}} - 0,5\sigma_{15\text{мм}}, \quad (5.10)$$

Напруження в місці розташування датчика FBG розглядається як номінальне напруження, і тоді ККН можна легко визначити за допомогою рівнянь (5.9) та (5.10).

На рис. 5.18, а показано графік залежностей отриманих значень ККН, що подано у порядку зростання. Максимальне значення ККН – 2,501, а мінімальне значення ККН – 1,655. Зазвичай, експериментальне визначення ККН - це складний процес з урахуванням різних факторів та невизначеностей, оскільки ККН має характер випадковості. У цьому дослідженні ККН вважається випадковою змінною нормального розподілу.

Встановлені залежності функції ЩРІ від ККН та КЩР від ККН наведено на рис. 5.18, б та рис. 5.18, в.

Обчислені статистичні властивості ККН наведено в таблиці 5.3.

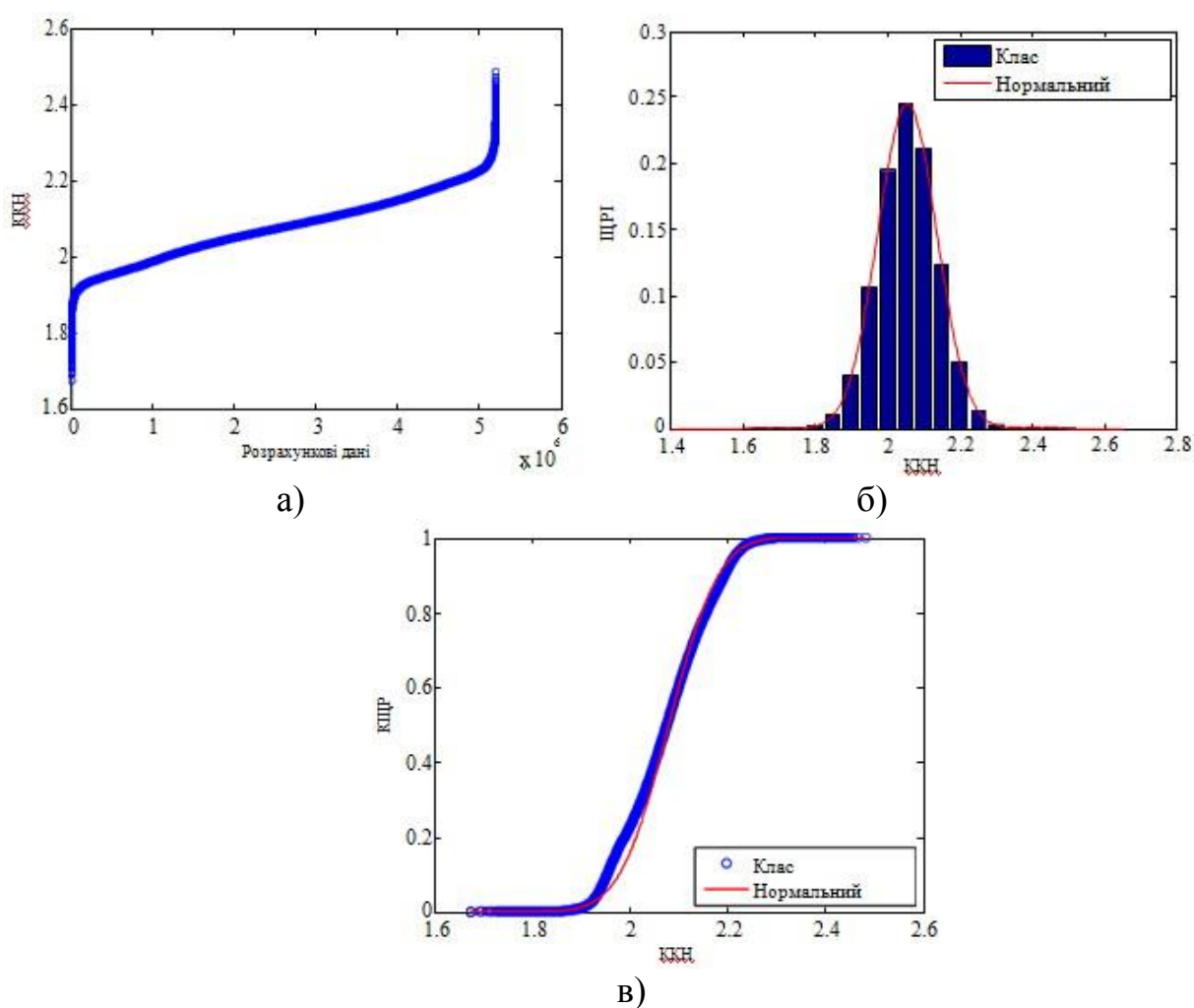


Рис. 5.18 – Графіки залежностей отриманих значень ККН, що подано у порядку зростання (а), функції ЩРІ від ККН (б) та КЩР від ККН (в).

Таблиця 5.3

Статистичні властивості ККН

Максимальне значення ККН	Мінімальне значення ККН	Стохастична властивість	Стандартне відхилення	Похибка
2,501	1,655	2,082	0,081	0,006

Оцінювання похибки та стохастичної властивості здійснювалося загально прийнятим методом Колмогорова-Смірнова за допомогою програмного забезпечення Matlab функцією "kstest". Для рівня значущості

0,05 ККН відповідає нормальному розподілу із середнім значенням 2,082 відповідно до результату тестування.

Висновки по розділу 5

1. Застосування тензометрического методу вимірювання деформацій і напружень в елементах металевих конструкцій можуть показати позитивні результати. Однак для здійснення на практиці запропонованого тензорезисторного способу вимірювання напружень необхідно пошук еталонного зразка, а це є проблематично через недостатню базу вимірювань тензорезисторів.
2. Запропонований метод для оцінки напруженого стану металевих конструкцій більш зручний, ніж тензорезисторний спосіб. Цим способом можна вимірювати напруження в завантажених елементах, коли неможливо знайти незавантажений еталонний зразок виробу.
3. Запропоновано метод вимірювання напружень за допомогою датчиків FBG, обробка показів яких здійснювалась за допомогою Wavelet- аналізу з багатороздільною здатністю. Крім того, множинна характеристика спектру напруженості була змодельована методом кінцевої функції ЩРІ разом із запропонованим підходом до оцінки параметрів на основі ГА. Нормальний розподіл імовірності було визначено для використання для моделювання спектру напруження з найнижчим значенням БКІ. Стохастична властивість ККН була досліджена за допомогою даних вимірювання та свідчить про те, що вона дотримується нормального розподілу із середнім значенням 2,082.

РОЗДІЛ 6

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ПРИЛАДОВИМИ СИСТЕМАМИ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ШВИДКОДІЇ

У відомих роботах [184,191,194, 197 і ін.] не вирішено питання обробки результатів вимірювання інтелектуальними приладовими системами в умовах невизначеності, що працюють в складній постійно змінній завадовій обстановці під впливом сильних завад.

Вирішення питань підвищення точності і швидкодії вимірювання інтелектуальними приладовими системами механічних величин можливо при використанні в її механізмі вимірювання певних алгоритмів, що забезпечують високу точність і достовірність вимірювань.

В даному розділі вперше отримані результати по оптимальному гасінню завад при отриманні сигналу приладовою системою. Запропоновано новий алгоритм вимірювання напружено – деформованого стану конструкції, що забезпечує високу точність і достовірність вимірювань.

Вперше дано оцінку точності вимірювання механічних величин на тлі дії негаусових адитивних завад, що призводить до підвищення точності вимірювання більш ніж в 2,5 рази.

Основні положення даного розділу відображені в публікаціях автора [66, 73-79].

6.1. Обробка результатів вимірювання в умовах невизначеності

На сучасному етапі розвитку інтелектуальних систем актуальним залишається питання створення методів швидкої обробки отриманих результатів, визначення точності їх вимірювання в реальному часі, зокрема при розв'язуванні задач управління та прийняття рішень в умовах невизначеності [66].

Результат вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами (ІПС) є повноцінним за умови, що він супроводжується оцінюванням його точності [66].

На обсяг обробки результатів точності вимірювання впливають різновиди вимірювання, кількість експериментальних даних, а також поставлені вимоги щодо точності вимірювання тощо. Лише під час прямих разових вимірювань отриманий результат дослідження може бути результатом вимірювання (за умови, що систематичні похибки вимірювання не коригують). В інших вимірюваннях обробка може здійснюватися за стандартизованими методиками (наприклад статистичними методами), або вимагати створення спеціальних алгоритмів [66].

У загальному випадку обробка передбачає такі етапи [66, 111-115]:

- попередній аналіз результатів спостережень (первинних вимірювань), їх систематизація відкидання явно недостовірних результатів;
- корекція впливів систематичних ефектів, а саме вивчення умов вимірювань, розрахунок та внесення поправок тощо;
- аналіз впливу випадкових ефектів, перевірка гіпотез про їх розподіл, вибір найкращих оцінок шуканих величин;
- оцінювання характеристик точності числового алгоритму, його стійкості;
- виконання розрахунків згідно з вибраним алгоритмом;
- аналіз отриманих результатів вимірювання;
- подача результатів вимірювань, характеристик їхньої точності згідно відповідної встановленої форми подання.

Кожен вид вимірювань має свої особливості і тому конкретний зміст зазначених операцій обробки результатів конкретного виду вимірювання має певні відмінності [66].

Практична цінність будь-якого механічного вимірювання визначається встановленням його похибки, тобто кількісної характеристики відхилення

результату вимірювання від його істинного значення (вимірюваної механічної величини) [66, 133, 134].

У сучасних вітчизняних нормативних документах для оцінки точності вимірювань все ще зберігається традиційний підхід, котрий ґрунтується на понятті "похибка вимірювань" [114, 133, 134]. Традиційний аналітичний підхід щодо визначення похибок вимірювання полягає у поділі їх на складові, кожна з яких обумовлена певними факторами впливу. Таким чином, це дозволяє досліджувати джерела походження складових похибки, здійснювати необхідні експерименти, у тому числі необхідні допоміжні вимірювання, та, як наслідок, визначати властивості похибки і за необхідною точністю оцінювати її складові. Володіючи інформацією про властивості складових похибки, можна правильно врахувувати їх при оцінюванні повної похибки, а також, за необхідності, ввести необхідну поправку у результат вимірювання або організовувати вимірювальний експеримент таким чином, щоб звести окремі складові, а потім, на їхній основі вивести повну похибку до допустимого значення. Так, зокрема, при вимірюванні витрат теплової енергії інтелектуальними приладовими системами похибка вимірювання має не перевищувати $\pm 5\%$ [66, 133, 134].

Для підвищення об'єктивності оцінки похибок вимірювань механічних величин і визначення шляхів їхнього зменшення, з метою покращання якості вимірювань, необхідно дослідити можливі причини виникнення та фактори впливу складових повної похибки механічних вимірювань та закономірності їхнього можливого змінювання [66, 133, 134].

Новий підхід рекомендується Міжнародним комітетом міри та ваги МКМВ, Міжнародною організацією законодавчої метрології МОЗМ, Міжнародною електротехнічною комісією МЕК та іншими міжнародними організаціями, інституціями та установами, що ґрунтується на оцінюванні точності вимірювань механічних величин за допомогою терміну «невизначеність вимірювань» [66, 116-120, 133, 134].

Уперше концепція невизначеності з'явилась у відповідь на появу нових, нетрадиційних об'єктів вимірювання сфер вимірювання (аналітичної хімії, психології, соціології, педагогіки, медицини тощо); прагнення усунути слабкі місця концепції похибки результату вимірювання; вплив нових наукових напрямів (кібернетики, теорії інформації, теорії прийняття рішень, теорії нечітких множин); розробка математичної моделі вимірювання, що відповідає сучасним тенденціям розвитку теорії вимірювань. У роботі L. Finkelstein «Theory and Philosophy of Measurement» запропоновано концепцію невизначеності як один із напрямів розвитку теорії вимірювань [66, 117, 133, 134].

Розроблена вченими світу теорія невизначеності зумовила появу документа Міжнародної організації стандартизації ISO «Guide to Expression of Uncertainty in Measurement», виданого 1993 р. [66, 118].

Головні відмінності концепції невизначеності від концепції похибки результату вимірювання наступні: відхід від поняття істинне значення вимірюваної величини як такого, що не піддається пізнанню; у зв'язку з останнім поняття похибки вимірювання механічної величини як відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної механічної величини втрачає сенс; невизначеність результату вимірювання характеризуються чи середнім квадратичним відхиленням (СКВ), чи симетричними границями, тому всі систематичні похибки підлягають корекції, а їх невилучені залишки входять до розсіювання результату вимірювання; у зв'язку з останнім недоцільним є сенс розподіл похибок результату вимірювання на систематичні і випадкові; тоді залишається лише розподіл компонентів невизначеності на компоненти категорії А та компоненти категорії В за способом їх оцінювання [66, 133, 134].

Між двома концепціями (невизначеності результату вимірювання і похибки результату вимірювання) є суттєві відмінності, які треба враховувати, складаючи методики обробки даних вимірювань і подаючи кінцевий результат. Але відкидати чи не помічати концепцію невизначеності

недоцільно. Це унеможливить гармонізацію вітчизняних і зарубіжних нормативно-технічних документів та уповільнить роботу в нетрадиційних сферах вимірювань [66].

В літературних джерелах з метрології та в міжнародних документах та нормативах відсутні досить переконливі обґрунтування про відмову від терміну «похибка» та заміни його новою дефініцією «невизначеність». Крім того, рекомендовані методи оцінювання у відображенні кількісних характеристик невизначеності мають або точно той самий, або дещо модифікований вигляд, як і для оцінювання похибок, зберігаючи при цьому, в основному, фізичний зміст. Тому заміна вище вказаних термінів обумовлена не лише принципово якісними, фундаментальними обґрунтуваннями, але і асоціативністю їхнього розуміння. Так наприклад, термін «похибка» асоціюється з визначеною величиною, а термін «невизначеність» асоціюється з певним сумнівом, невпевненістю, що, нібито, більше відображає фізичний зміст результату вимірювання [66, 109 – 111, 133, 134].

Термін «невизначеність» означає сумнів, він розширює смисл невизначеності вимірювання в бік сумніву відносно результату вимірювання.

Терміни «істинне значення вимірюваної величини» і «похибка результату вимірювання» не використовують у формуванні групи понять, пов'язаної з результатом вимірювання. Використовують поняття «оцінене значення вимірюваної величини» і «невизначеність» [66, 133, 134].

Невизначеність, за ДСТУ 2681-94, - це оцінка, що характеризує діапазон значень, у якому є істинне значення вимірюваної величини. У керівному документі ISO наведено таке визначення: невизначеність вимірювання - параметр, об'єднаний з результатом вимірювання, що характеризує розсіювання значень вимірюваної величини [66].

Невизначеність характеризує розсіювання значень вимірюваної величини. Параметром розсіювання є середнє квадратичне відхилення чи

половина ширини інтервалу розсіювання з установленим рівнем довіри. Рівень довіри в цьому випадку дорівнює одиниці [66, 111].

Невизначеність результату вимірювання (НВ) включає багато компонентів. Деякі з них можна охарактеризувати середнім квадратичним відхиленням СКВ, отриманим на основі статистичного розподілу результату вимірювань. Решту компонентів можна також охарактеризувати середнім квадратичним відхиленням СКВ, але отриманим на основі суб'єктивно визначеного розподілу ймовірностей чи за допомогою іншої інформації [66, 100].

Очевидно, що результат вимірювання є найкращою оцінкою значення вимірюваної величини коли всі складові невизначеності, що виникають у результаті систематичних ефектів, вилучено, наприклад, за допомогою корекції, введення поправки і використання еталонів; невилучені залишки входять до розсіювання результатів вимірювання, і тобто до невизначеності. Отже, невизначеність вимірювань означає сумнів відносно вірогідності результатів вимірювань [66].

Для кількісного представлення невизначеності вимірювання пропонується її три види, а саме: стандартна невизначеність типу А і типу В, сумарна стандартна невизначеність та розширена невизначеність [66, 133, 134]

Компоненти типу А - компоненти невизначеності результату вимірювання НВ, які оцінюють за допомогою статистичного аналізу ряду вимірювань [66, 133, 134].

Компоненти типу В — компоненти невизначеності результату вимірювання НВ, які оцінюють за допомогою інших операцій [66].

Стандартна невизначеність (u) – це невизначеність результату прямих вимірювань, що виражена через середнє квадратичне відхилення СКВ [66].

За способом обчислення і представлення стандартної невизначеності розрізняють два її типи: тип А і тип В [66, 133, 134].

Стандартна невизначеність типу A (u_A) - це невизначеність, котра обчислюється за допомогою статистичних методів обробки результатів багаторазових вимірювань [66, 133, 134].

Оцінювання стандартної невизначеності типу A відбувається наступним чином [66, 133, 134]:

1. Якщо кількість дослідів $n < 10$, тоді u_A не оцінюють. Для умови $10 \leq n < 20$ – якщо закон розподілу імовірностей є невідомим, тоді для оцінювання u_A приймають рівномірний закон. Якщо $n \geq 20$, тоді закон розподілу імовірностей визначається апроксимацією експериментальних даних [66, 133, 134].
2. Для прямого вимірювання результат вимірювань визначають як середнє арифметичне від отриманих значень. Тоді невизначеність за типом A визначається за допомогою формули [66, 133, 134]:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (6.1)$$

де x_i – отриманий результат вимірювання механічної величини;

$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ – середнє арифметичне від результатів вимірювання;

n – загальна кількість проведених вимірювань.

3. Для опосередкованого вимірювання результат даного вимірювання визначається за оцінками декількох величин. Тоді невизначеність за типом A обчислюється для кожної вихідної величини [66, 133, 134]:
 - якщо значення величини розподілені згідно рівномірного закону, тоді визначаємо за формулою:

$$u_A = \frac{b}{\sqrt{3}}, \quad (6.2)$$

де b – півширина інтервалу (для несиметричного закону розподілу $b = (b_+ + (-b_-))/2$);

- якщо значення величини розподілені за нормальним законом, тоді невизначеність обчислюється як середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (6.3)$$

У випадку, коли дисперсію результатів вимірювань було враховано у невизначеності, то додатково похибку ПС враховувати непотрібно, оскільки вона відображена у дисперсії [66, 133, 134].

Стандартна невизначеність типу В (u_B) - це невизначеність, що визначається за певною апріорною інформацією, а саме: даними попередніх вимірювань механічних величин, що входять до складу рівняння обрахунку; даними вимірювань механічних величин, що ґрунтуються на досвіді експериментатора чи загальних знаннях про поведінку відповідних конструкцій та засобів вимірювальної техніки, а також даними їхньої перевірки, атестування та калібрування; невизначеності констант, певних довідкових даних тощо. Невизначеність усіх цих даних, зазвичай, відображають межами відхилення результату вимірювання фізичної чи механічної величини від оцінки її істинного значення. Тому невизначеність вимірювань за типом В залежить, в основному, від закону розподілу можливих значень вимірюваної величини [66, 133, 134].

Оцінка стандартної невизначеності типу В відбувається у такому порядку [66, 133, 134]:

1. Складаються переліки вимірюваних вихідних величин; невимірюваних впливових вихідних величин; коефіцієнтів і констант; введених поправок

на відомі систематичні похибки; додаткових похибок тощо ґрунтуючись на рівнянні залежності вимірюваної величини від вихідних величин.

2. Невизначеності усіх вхідних величин оцінюють інтервалами і перетворюють їх у середньоквадратичне відхилення, при цьому закон розподілу їхніх імовірностей, якщо він невідомий, приймається рівномірним. Формула для перерахування інтервальної оцінки у середньоквадратичне відхилення буде [66, 133, 134]:

$$\sigma = b/t, \quad (6.4)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення (СКВ); b – напівширина інтервалу; t – значення функції Лапласа для нормального закону розподілу ймовірностей або аналог значення функції Лапласа для іншого закону розподілу.

Сумарна стандартна невизначеність – це стандартна невизначеність результату непрямих вимірювань. Вона має фізичний зміст дисперсії результату непрямих вимірювань і обчислюється через дисперсії (квадрати стандартних невизначеностей) інших фізичних величин (аргументів), через які визначається шукана фізична величина [66, 133, 134].

Якщо величини, що входять у рівняння, мають різні одиниці вимірювання, то безпосередньо сумувати інтервальні оцінки невизначеності не можна, їх необхідно звести до безрозмірних величин – середньоквадратичних відхилень згідно із формулою (5.4), за однакових рівнів довіри $P(\partial)$ [66, 133, 134].

Якщо закон розподілу невідомий, то під час перерахунку інтервальної оцінки в середньоквадратичне відхилення, приймають рівномірний закон, а під час перерахунку середнього квадратичного відхилення СКВ в інтервальну оцінку – нормальний закон. Тобто значення функції Лапласа t або його аналогу обирають таким, щоб забезпечити «запас» невизначеності.

Якщо закон розподілу відомий, то коефіцієнт для перерахунку приймають згідно з цим законом [66, 133, 134].

Оцінювання сумарної стандартної невизначеності відбувається наступним чином [66]:

1. Під час вимірювання показників якості текстильних матеріалів сумарну стандартну невизначеність типу *A* визначають за формулою для некорельованих величин [66, 133, 134]:

$$u_{CA} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_B^2(x_i)}, \quad (6.5)$$

де $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – залежність вимірюваної величини від вхідних величин (рівняння вимірювання); $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт), який визначають як часткову похідну рівняння залежності вимірюваної величини за однією з вихідних величин.

Коефіцієнт впливу (ваговий коефіцієнт) відображає зміну впливу даної вхідної величини на результат вимірювання; $u_A(x_i)$ – стандартна невизначеність за типом *A* вихідної величини [66, 133, 134].

2. Сумарну стандартну невизначеність типу *B* визначають за формулою [66, 133, 134]:

$$u_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_B^2(x_i) + u_B^2(x_i)}, \quad (6.6)$$

де $u_B(x_i)$ – стандартна невизначеність за типом *B* величин, що входять у рівняння залежності вимірюваної величини; $u_B(z_i)$ – стандартна невизначеність за типом *B* величин, що не входять у рівняння залежності вимірюваної величини.

Якщо впливовий фактор не входить у рівняння залежності вимірюваної величини, його враховують у невизначеності, але без урахування коефіцієнту впливу (вагового коефіцієнту) [66, 133, 134].

3. Тоді, сумарна стандартна невизначеність [66, 133, 134]:

$$u_C = \sqrt{u_{CA}^2 + u_{CB}^2}, \quad (6.7)$$

Розширена невизначеність – це величина, що визначає інтервал, у границях якого знаходиться більша частина результатів непрямих вимірювань, які з достатньою підставою можуть бути приписані вимірюваній величині. Розширена невизначеність вимірювань обчислюється через сумарну стандартну невизначеність [66, 133, 134].

Розширену невизначеність визначають за наступною формулою [66]:

$$U = k \cdot u_C, \quad (6.8)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який залежить від заданого рівня довіри $P(\partial)$ і ефективного числа ступенів волі. Для рівня довіри $P(\partial) = 0,95$ за нормального закону розподілу ймовірностей коефіцієнт охоплення $k = 1,96$, за рівномірного закону розподілу – $k = 1,65$ [133, 134].

Отже, підсумовуючи вищенаведене, маємо [66, 133, 134]:

1. Основою для статистичних досліджень є вимірювання, що являють собою метрологічні дослідження. За останні десятиріччя в теоретичній та практичній метрології спостерігаються зміни, що пов'язані з введенням, в першу чергу, дефініції «невизначеність» для оцінювання достовірності отриманих результатів вимірювань та безпосередньо самих засобів вимірювання. Поряд з цим, при проведенні деяких метрологічних досліджень бачимо, що паралельно також зберігається і застосовується поняття «похибка». Така подвійність трактування оцінки результатів

вимірювань зумовлює досить повільне впровадження поняття невизначеності в метрологічну практику України.

2. Поняття «невизначеність вимірювання» можна трактувати як параметр, що характеризує розсіювання значень, який включає в себе складові, що викликані систематичними впливами.
3. Невизначеність визначення вимірюваної механічної величини є мінімальною невизначеністю вимірювання. Даний інтервал, який називається «вимірюваним значенням величини», може бути представленим як один із його значень.

6.2. Непараметрична ідентифікація щільності розподілу імовірності в складній постійно змінній завадовій обстановці

В умовах сьогодення спостерігається постійний ріст складності запропонованих інформаційно - вимірювальних систем, апаратури, засобів автоматизації. Разом з тим підвищуються вимоги щодо ефективності керування цими системами, скорочення термінів розробки та випробовувань даних систем [71].

Сучасні інформаційно - вимірювальні системи працюють в складній постійно змінній завадовій обстановці під впливом сильних завад. Одним із ефективних методів боротьби з цими завадами є застосування нелінійних засобів пригнічування, амплітудні характеристики яких залежать від щільності розподілу вірогідності завад [71].

Проблема непараметричної ідентифікації щільності розподілу вірогідності завад є найбільш складною і містить значний обсяг інформаційних джерел. Серед відомих непараметричних оцінок щільності розподілу вірогідності завад є ядерна оцінка Розенблатта – Парзена – Ченцова з гауссовим ядром, яка при оцінюванні одновірної щільності розподілу вірогідності завад має вигляд [71]:

$$\hat{w}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [2\pi\sigma_n h(N)]_{exp}^{-1} \left\{ -\frac{(n-n_i)^3}{2h^2(N)\sigma_n^2} \right\}, \quad (6.9)$$

де N - об'єм вибірки; $n_i = n(t_i)$ - незалежні спостереження стаціонарної завади в моменти часу t_i , де $i=1, 2, \dots, N$; σ_n^2 - дисперсія завади або її вибіркова оцінка; $h(N)$ – параметр згладжування оцінки щільності розподілу вірогідності завад, який вибирається таким чином, щоб при $N \rightarrow \infty$ ряд (5.9) сходився з забезпеченням відповідних якостей оцінки.

В роботі [109] параметр $h(N)$ рекомендується вибирати з умови [71]:

$$h(N) = N^{-b}, \quad 0 < b < 0,5$$

У цьому випадку оцінка (5.9) буде схожою на полігауссову апроксимацію [71]:

$$\hat{w}(n) = \sum_{i=1}^L \frac{p_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(n-m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (6.10)$$

де $\sum_{i=1}^L p_i = 1$; p_i - вагомий коефіцієнт, що, зазвичай, інтерпретується як апріорна вірогідність i -й гауссової складової; m_i та σ_i^2 - параметри i -й складової щільності розподілу вірогідності завад.

Представлення щільності розподілу вірогідності завад у вигляді полігауссового ряду (5.10) дозволяє істотно спростити розв'язок задачі нелінійної обробки. Таким чином, нелінійний фільтр зводиться до сукупності фільтрів Калмана і сумуванню їх оцінок. Однак ряд (5.10) при $N \rightarrow \infty$ не сходиться [71].

На відміну від (5.10) оцінка (5.9) має наявне сходження, до того ж її можна інтерпретувати як полігауссову апроксимацію ряду (5.10) за умови

$L = N$; $p_i = N^{-1}$; $m_i = n_i$; $\sigma_i^2 = h^2(N)\sigma_n^2$. Це дозволяє сумісно застосовувати достоїнства обох оцінок (5.9) та (5.10) при синтезі пристроїв нелінійної обробки [71].

6.3. Результати експериментальних досліджень вимірювання напруження під дією негаусових завад

Для отримання якісних показів вимірювання параметрів напружено-деформованого стану приладовою системою при випадкових збурюваннях та шумів, розглянемо задачу побудови фільтра Калмана.

Фільтр Калмана - це алгоритм, що використовує послідовності вимірювань впродовж часу, які містять шум (випадкові відхилення) та інші неточності й видає оцінки невідомих змінних, що є потенційно точнішими за базові.

Фільтр Калмана працює рекурсивно на потоках зашумлених вхідних даних, і видає статистично оптимальну оцінку базового стану системи. Фільтр названо на честь Рудольфа Калмана, одного з головних розробників його теорії.

Фільтр Калмана має численні застосування у технології. Крім того, фільтр Калмана є широко застосовуваною концепцією в аналізі часових рядів, що використовується у таких галузях як обробка сигналів та економетрія.

Цей алгоритм працює як двокроковий процес. На кроці передбачення фільтр Калмана видає оцінки змінних поточного стану, разом із їхніми невизначеностями. Щойно отримано спостереження виходу наступного вимірювання (неодмінно якоюсь мірою спотворене відхиленням, включно з випадковим шумом), ці оцінки уточнюються з використанням середнього зваженого, в якому більше ваги надається оцінкам з вищою визначеністю.

Розглянемо задачу побудови фільтра Калмана, коли рівняння системи має вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A(t)x(t) + B(t)v(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + \omega(t) + D(t)v(t) \end{aligned} \right\}. \quad (6.10)$$

де $x(t)$ – вектор стану ($n \times 1$), $v(t)$ – вектор входу ($\tau \times 1$), $y(t)$ – вектор виходу ($m \times 1$), $A(t)$ – матриця системи ($n \times n$), $B(t)$ – матриця входу ($n \times \tau$), $C(t)$ – матриця виходу ($m \times n$).

При цьому вважаємо, що $v(t)$ і $\omega(t)$ являють собою нестационарні білі шуми, тобто мають нульові математичні очікування і кореляційні матриці:

$$K_{\omega}(t_1, t_2) = \psi_{\omega}(t_1) \delta(t_1 - t_2); \quad K_v(t_1, t_2) = \psi_v(t_1) \delta(t_1 - t_2),$$

де $\delta(t)$ – дельта-функція Дірака.

Якщо процеси $v(t)$ і $\omega(t)$ є відмінними від білого шуму, то, як показано в роботі [181], збільшуючи розмірність вектора стану $x(t)$, цей випадок можна звести до розглянутій задачі.

Початковий стан $x(t_0) = x_0$ є векторною випадковою величиною. Покладаються заданими її математичне очікування $M\{x_0\} = m_{x_0}$ і матриця дисперсій $M \begin{Bmatrix} x_0 & x_0^T \end{Bmatrix} = D_{x_0}$.

Процеси $\omega(t)$, $v(t)$ і початковий стан x_0 є некорельованими, тобто $M \begin{Bmatrix} \omega(t_1) & v^T(t_2) \end{Bmatrix} = 0$; $M \begin{Bmatrix} x_0 & \omega^T(t) \end{Bmatrix} = 0$ и $M \begin{Bmatrix} x_0 & v^T(t) \end{Bmatrix} = 0$ для будь-яких $t_1, t_2, t \geq t_0$.

Оцінка вектора стану шукається в класі оптимальних лінійних оцінок:

$$\hat{x}(t) = m_x(t) + \int_{t_0}^t W(t, \tau) y(\tau) d\tau. \quad (6.11)$$

Матриця $W(t, \tau)$ оптимальної оцінки задовольняє рівнянню Вінера-Хопфа [214, 215]:

$$\int_{t=0}^t W(t, \tau_2) K_y(\tau_2 \tau_1) d\tau_2 = K_{xy}(t, \tau_1), \quad \tau_1 \in [t_0, t]. \quad (6.12)$$

Спочатку отримаємо корисні вирази, використовуючи формулу Коші [197, 200]:

$$x(t) = \Phi(t, t_0)x_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)B(\tau)v(\tau)d\tau, \quad (6.13)$$

Отримаємо:

$$\begin{aligned} M \left\{ y(t_1) v^T(t_2) \right\} &= D(t_1) \psi_v(t_1) \delta(t_1 - t_2) + \\ &+ \begin{cases} 0, & \text{если } t_1 < t_2 \\ C(t_1) \Phi(t_1, t_2) B(t_2) \psi_v(t_2), & \text{если } t_1 > t_2 \end{cases}, \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$M \left\{ x(t_1) \omega^T(t_2) \right\} = 0, \quad (6.15)$$

$$M \left\{ y(t_1) \omega^T(t_2) \right\} = \psi_v(t_1) \delta(t_1 - t_2). \quad (6.16)$$

Введемо позначення:

$$S(t) = \omega(t) + D(t)v(t). \quad (6.17)$$

Тоді математичне очікування [121, 122] буде:

$$M \{s(t)\} = M \{\omega(t) + D(t)v(t)\} = 0.$$

Корреляційна матриця матиме вигляд:

$$K_s(t_1, t_2) = M \left\{ s(t_1) s^T(t_2) \right\} = M \left\{ \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \dot{\omega}(t_1) + D(t_1) \dot{v}(t_1) \end{smallmatrix} \right] \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \dot{\omega}(t_2) + D(t_2) \dot{v}(t_2) \end{smallmatrix} \right]^T \right\} =$$

$$= [\Psi_\omega(t_1) + D(t_1) \Psi_v(t_1) D^T(t_2)] \delta(t_1 - t_2).$$

Таким чином, випадковий процес $s(t)$ являє собою нестационарний білий шум з інтенсивністю:

$$\psi_s(t_1, t_2) = \psi_\omega(t_1) + D(t_1) \psi_v(t_1) D^T(t_2). \quad (6.18)$$

Випадкові процеси $s(t)$ і $v(t)$ — корельовані, визначимо їхні взаємні кореляційні матриці:

$$K_{vs}(t_1, t_2) = M \left\{ \dot{v}(t_1) \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \dot{\omega}(t_2) + D(t_2) \dot{v}(t_2) \end{smallmatrix} \right]^T \right\} = \psi_v(t_1) D^T(t_2) \delta(t_1 - t_2);$$

$$K_{sv}(t_1, t_2) = M \left\{ \left[\begin{smallmatrix} 0 \\ \dot{\omega}(t_1) + D(t_1) \dot{v}(t_1) \end{smallmatrix} \right] \dot{v}^T(t_2) \right\} = D(t_1) \psi_v(t_1) \delta(t_1 - t_2). \quad (6.19)$$

В подальшому будемо розглядати задачу побудови фільтра Калмана для системи, що описується рівняннями [121]:

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x(t) + B(t)v(t);$$

$$y(t) = C(t)x(t) + s(t). \quad (6.20)$$

Випадкові процеси $v(t)$ і $s(t)$ являють собою нестационарні корельовані білі шуми. Їх взаємні кореляційні матриці визначаються формулами (6.19), а інтенсивність процесу $s(t)$ - формулою (6.18). Щодо початкового стану $x(t_0) = x_0$ справедливі припущення початкової постановки завдання [121-123].

Використовуючи вирази (6.14) і (6.16), знайдемо:

$$\begin{aligned}
K_{zs}(t_1, t_2) &= M \left\{ \dot{x}(t_1) \dot{s}^T(t_2) \right\} = \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t_1, \tau) B(\tau) M \left\{ \dot{v}(\tau) \dot{s}^T(t_2) \right\} d\tau = \\
&= \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_1, \tau) B(\tau) \psi_v(\tau) D^T(t_2) \delta(\tau - t_2) d\tau = \\
&= \begin{cases} 0, & \text{якщо } t_1 < t_2; \\ \Phi(t_1, t_2) B(t_2) \psi_v(t_2) D^T(t_2), & \text{якщо } t_1 > t_2. \end{cases} \quad (6.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{ys}(t_1, t_2) &= M \left\{ \dot{y}(t_1) \dot{s}^T(t_2) \right\} = M \left\{ \left[C(t_1) \dot{x}(t_1) + \dot{s}(t_1) \right] \dot{s}^T(t_2) \right\} = \\
&= K_s(t_1, t_2) + \begin{cases} 0, & \text{якщо } t_1 < t_2; \\ C(t_1) \Phi(t_1, t_2) B(t_2) \psi_v^T(t_2) D(t_2), & \text{якщо } t_1 > t_2. \end{cases} \quad (6.22)
\end{aligned}$$

Для визначення рівняння фільтру Калмана продиференціюємо по t обидві частини рівняння Вінера - Хопфа[121]. Тоді отримаємо:

$$\begin{aligned}
W(t, t) K_y(t, \tau_1) + \int_{t_0}^t \frac{\partial W(t, \tau_2)}{\partial t} K_y(\tau_2, \tau_1) d\tau_2 &= \frac{\partial}{\partial t} M \left\{ \dot{x}(t) \dot{y}^T(\tau_1) \right\} = \\
&= M \left\{ \left[A(t) \dot{x}(t) + B(t) \dot{v}(t) \right] \dot{y}^T(\tau_1) \right\} = A(t) K_{xy}(t, \tau_1), \quad \tau_1 < t.
\end{aligned}$$

Маємо:

$$\begin{aligned}
K_y(t, \tau_1) &= M \left\{ \dot{y}(t) \dot{y}^T(\tau_1) \right\} = M \left\{ \left[C(t) \dot{x}(t) + \dot{s}(t) \right] \dot{y}^T(\tau_1) \right\} = \\
&= C(t) K_{xy}(t, \tau_1) \text{ при } \tau_1 < t.
\end{aligned}$$

Тоді:

$$[A(t) - W(t, t) C(t)] K_{xy}(t, \tau_1) - \int_{t_0}^t \frac{\partial W(t, \tau_2)}{\partial t} K_y(\tau_2, \tau_1) d\tau_2 = 0, \quad \tau_1 < t.$$

Підставимо в отримане рівняння значення $K_{xy}(t, \tau_1)$ з рівняння Вінера-Хопфа, тоді:

$$\int_{t_0}^t \left\{ [A(t) - W(t, t)C(t)]W(t, \tau_2) - \frac{\partial W(t, \tau_2)}{\partial t} \right\} K_y(\tau_2, \tau_1) d\tau_2 = 0, \quad \tau_1 < t.$$

Ця рівність має місце при довільній кореляційній матриці $K_y(\tau_2, \tau_1)$. Тому вираз у фігурних дужках дорівнюватиме нулю. Тоді:

$$[A(t) - W(t, t)C(t)]W(t, \tau_2) = \frac{\partial W(t, \tau_2)}{\partial t}, \quad \tau_2 \in [t_0, t].$$

Продиференціюємо тепер по t обидві частини рівності (6.11). Матимемо:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}}{dt} &= \frac{dm_x(t)}{dt} + \int_{t_0}^t \frac{\partial W(t, \tau)}{\partial t} \dot{y}(\tau) d\tau + W(t, t) \dot{y}(t) = \\ &= A(t)m_x(t) + \int_{t_0}^t [A(t) - W(t, t)C(t)]W(t, \tau) \dot{y}(\tau) d\tau + W(t, t) \dot{y}(t) = \\ &= A(t)\hat{x}(t) + W(t, t)[y(t) - C(t)\hat{x}(t)] \end{aligned} \quad (6.23)$$

Рівняння (6.23) являє собою рівняння фільтру Калмана. В цьому рівнянні $W(t, t) = H(t)$ — коефіцієнт підсилення фільтру.

Коефіцієнт підсилення фільтру Калмана. Перейдемо до його визначення. Маємо:

$$\begin{aligned} K_y(t_1, t_2) &= M \left\{ \dot{y}(t_1) \dot{y}^T(t_2) \right\} = M \left\{ \dot{y}(t_1) \left[\dot{x}^T(t_2) C^T(t_2) + \dot{s}^T(t_2) \right] \right\} = \\ &= K_{yx}(t_1, t_2) C^T(t_2) + K_{ys}(t_1, t_2). \end{aligned}$$

Підставивши це значення $K_y(t_1, t_2)$ в рівняння Вінера-Хопфа, отримаємо:

$$K_{xy}(t, \tau_1) = \int_{t_0}^t W(t, \tau_2) [K_{xy}(\tau_2, \tau_1) C^T(\tau_1) + K_{ys}(\tau_2, \tau_1)] d\tau_2 = \\ = K_{\hat{x}\hat{x}}(t, \tau_1) C^T + W(t, \tau_1) \psi_s(\tau_1, \tau_1).$$

Ліва частина рівняння має вид:

$$K_{xy}(t, \tau_1) = M \left\{ \overset{\circ}{x}(t) \left[\overset{\circ}{x}^T(\tau_1) C^T(\tau_1) + \overset{\circ}{s}^T(\tau_1) \right] \right\} = \\ = K_x(t, \tau_1) C^T(\tau_1) + \Phi(t, \tau_1) B(\tau_1) \psi_v(\tau_1) D^T(\tau_1).$$

Тоді:

$$W(t, \tau_1) \psi_s(\tau_1, \tau_1) = K_{\tilde{x}\tilde{x}}(t, \tau_1) C^T(\tau_1) + \Phi(t, \tau_1) B(\tau_1) \psi_v(\tau_1) D^T(\tau_1),$$

де $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ — помилка оцінювання.

Перейдемо до границі в обох частинах цієї рівності при $\tau_1 \rightarrow t$.
Отримаємо:

$$W(t, t) = H(t) = [K_{\tilde{x}\tilde{x}}(t, t) C^T(t) + B(t) \psi_v(t) D^T(t)] \psi_s^{-1}(t, t).$$

Враховуючи, що кореляційна матриця $K_{\tilde{x}\tilde{x}}(t, t) = K_{\tilde{x}}(t, t) = D_{\tilde{x}}(t)$,
де $D_{\tilde{x}}(t)$ — матриця дисперсій помилки оцінювання, остаточно будемо мати:

$$H(t) = [D_{\tilde{x}}(t) C^T(t) + B(t) \psi_v(t) D^T(t)] \psi_s^{-1}(t, t). \quad (6.24)$$

Рівняння для визначення $D_{\tilde{x}}(t)$ — матриці дисперсії помилки оцінювання буде:

$$\begin{aligned}
\frac{d\hat{x}}{dt} &= \frac{dx}{dt} - \frac{d\hat{x}}{dt} = A(t)x(t) + B(t)v(t) - A(t)\hat{x}(t) - H(t)[y(t) - C(t)\hat{x}(t)] = \\
&= A(t)\bar{x}(t) - H(t)C(t)\tilde{x}(t) + B(t)v(t) - H(t)s(t) = P(t)\tilde{x}(t) + B(t)v(t) - H(t)s(t),
\end{aligned} \tag{6.25}$$

де матриця:

$$P(t) = A(t) - H(t)C(t). \tag{6.26}$$

Згідно формули Коші, рішення цього рівняння, що задовольнятиме початкову умову $\tilde{x}(t_0) = x_0$ буде мати вигляд:

$$\tilde{x}(t) = X(t, t_0)x_0 + \int_{t_0}^t X(t, \tau)[B(\tau)v(\tau) - H(\tau)s(\tau)]d\tau,$$

де $X(t, t_0)$ – фундаментальна матриця вирішення однорідної системи $\frac{d\tilde{x}}{dt} = P(t)\tilde{x}(t)$.

Тоді кореляційна матриця матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
K_{\tilde{x}}(t_1, t_2) &= M\left\{\tilde{x}(t_1)\tilde{x}^T(t_2)\right\} = X(t_1, t_0)D_{x_0}X^T(t_2, t_0) + \\
&+ \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_2} X(t_1, \tau_1)[B(\tau_1)K_v(\tau_1, \tau_2)B^T(\tau_2) - B(\tau_1)K_{vs}(\tau_1, \tau_2)H^T(\tau_2) - \\
&- H(\tau_1)K_{sv}(\tau_1, \tau_2)B^T(\tau_2) + H(\tau_1)K_s(\tau_1, \tau_2)H^T(\tau_2)]X^T(t_2, \tau_2)d\tau_1d\tau_2.
\end{aligned}$$

Матриця дисперсій помилки оцінювання визначатиметься за формулою:

$$\begin{aligned}
D_{\tilde{x}}(t) &= X(t, t_0) D_{x_0} X^T(t, t_0) + \\
&+ \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t X(t, \tau_1) \{ B(\tau_1) \psi(\tau_1) B^T(\tau_2) - B(\tau_1) \psi_v(\tau_1) D^T(\tau_2) H^T(\tau_2) - \\
&- H(\tau_1) D(\tau_1) B^T(\tau_2) + H(\tau_1) [D(\tau_1) \psi_v(\tau_1) D^T(\tau_2) + \\
&+ \psi_\omega(\tau_1)] H^T(\tau_2) \} X^T(t, \tau_2) \delta(\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 = \\
&= X(t, t_0) D_{x_0} X^T(t, t_0) + \int_{t_0}^t X(t, \tau) \{ B(\tau) \psi_v(\tau) B^T(\tau) - B(\tau) \psi_v(\tau) D^T(\tau) H^T(\tau) - \\
&- H(\tau) D(\tau) \psi_v(\tau) B^T(\tau) + H(\tau) [D(\tau) \psi_v(\tau) D^T(\tau) + \psi_\omega(\tau)] H^T(\tau) \} X^T(t, \tau) d\tau.
\end{aligned}$$

Продиференціюємо цю рівність по t . Отримаємо:

$$\begin{aligned}
\frac{dD_{\tilde{x}}(t)}{dt} &= P(t) X(t, t_0) D_{x_0} X^T(t, t_0) + X(t, t_0) D_{x_0} X^T(t, t_0) P^T(t) + \\
&+ \int_{t_0}^t P(t) X(t, \tau) \{ B(\tau) \psi_v(\tau) B^T(\tau) - B(\tau) \psi_v(\tau) D^T(\tau) H^T(\tau) - \\
&- H(\tau) D(\tau) \psi_v(\tau) B^T(\tau) + H(\tau) [D(\tau) \psi_v(\tau) D^T(\tau) + \psi_\omega(\tau)] H^T(\tau) \} X^T(t, \tau) d\tau + \\
&+ \int_{t_0}^t X(t, \tau) \{ B(\tau) \psi_v(\tau) B^T(\tau) - B(\tau) \psi_v(\tau) H^T(\tau) - H^T(\tau) - H(\tau) D(\tau) \psi_v(\tau) B^T(\tau) + \\
&+ H(\tau) [D(\tau) \psi_v(\tau) D^T(\tau) + \psi_\omega(\tau)] H^T(\tau) \} X^T(t, \tau) P^T(t) d\tau + B(t) \psi_v(t) B^T(t) - \\
&- B(t) \psi_v(t) D^T(t) H^T(t) - H(t) D(t) \psi_v(t) B^T(t) + H(t) [D(t) \psi_v(t) D^T(t) + \\
&+ \psi_\omega(t)] H^T(t) = P(t) D_{\tilde{x}}(t) + D_{\tilde{x}}(t) P^T(t) + B(t) \psi_v(t) B^T(t) - B(t) \psi_v(t) D^T(t) H^T(t) - \\
&- H(t) D(t) \psi_v(t) B^T(t) + H(t) [D(t) \psi_v(t) D^T(t) + \psi_\omega(t)] H^T(t). \quad (6.27)
\end{aligned}$$

Враховуючи вирази (6.24) для $H(t)$ і (6.26) для $P(t)$, отримаємо:

$$\begin{aligned}
\frac{dD_{\tilde{x}}(t)}{dt} = & A(t)D_{\tilde{x}}(t) + D_{\tilde{x}}(t)A^T(t) - D_{\tilde{x}}(t)C^T(t)\Psi_s^{-1}(t)C(t)D_{\tilde{x}}(t) + B(t)\Psi_v(t)B^T(t) - \\
& - D_{\tilde{x}}(t)C^T(t)\Psi_s^{-1}(t)\Psi_v(t)B^T(t) - B(t)\Psi_v(t)D^T(t)\Psi_s^{-1}(t)C(t)D_{\tilde{x}}(t) - \\
& - B(t)\Psi_v(t)D^T(t)\Psi_s^{-1}(t)D(t)\Psi_v(t)B^T(t) = \tilde{A}(t)D_{\tilde{x}}(t) + D_{\tilde{x}}(t)\tilde{A}^T(t) - \\
& - D_{\tilde{x}}(t)C^T(t)\Psi_s^{-1}(t)C(t)D_{\tilde{x}}(t) + B(t)\Psi_v(t)[E - D^T(t)\Psi_s^{-1}(t)D(t)\Psi_v(t)]B^T(t).
\end{aligned}
\tag{6.28}$$

Тут $\tilde{A}(t) = A(t) - B(t)\Psi_v(t)D^T(t)\Psi_s^{-1}(t)C(t)$.

У випадку, коли матриця $D(t)=0$, тоді $\tilde{A}(t)=A(t)$ і коефіцієнт підсилення фільтра Калмана $H(t) = D_{\tilde{x}}(t)C^T(t)\Psi_{\omega}^{-1}(t)$.

Рівняння (6.28) являє собою матричне диференціальне рівняння типу Ріккати. Воно задовольняє умовам теореми існування і єдиності рішення, тобто для заданого початкового значення D_{x0} існує єдине рішення $D_{\tilde{x}}(t)$ цього рівняння.

Таким чином, для системи управління, описуваної рівняннями (6.23) отримані рівняння фільтра Калмана (6.27), вираз (6.28) для коефіцієнта посилення фільтра і рівняння (6.29) для визначення матриці дисперсій помилки оцінювання.

Стаціонарний фільтр Калмана. Розглянемо безперервну лінійну стаціонарну автоматичну систему, яка описується рівняннями [197-220]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) + Bv(t), \\ y(t) &= Cx(t) + \omega(t) + Dv(t). \end{aligned} \right\}, \tag{6.29}$$

де $x(t)$ – вектор стану ($n \times 1$), $v(t)$ – вектор входу ($\tau \times 1$), $y(t)$ – вектор виходу ($m \times 1$), $A(t)$ – матриця системи ($n \times n$), $B(t)$ – матриця входу ($n \times \tau$), $C(t)$ – матриця виходу ($m \times n$). Характерні числа матриці A розміщені в лівій

напівплощині $Re \lambda_i < 0$.

Вважаємо, що $\omega(t)$ і $v(t)$ є стаціонарними білими шумами, тобто мають нульові математичні очікування і кореляційні матриці:

$$K_{\omega}(\tau) = \psi_{\omega} \delta(\tau); \quad K_v(\tau) = \psi_v \delta(\tau),$$

де $\tau = t_1 - t_2$, $\delta(t)$ — дельта-функція Дірака.

Тоді процеси $\omega(t)$ і $v(t)$ вважатимуться некорельованими, тобто:

$$M \left\{ \overset{0}{\omega}(t_1) \overset{0}{v}^T(t_2) \right\} = 0 \text{ для будь-яких } t_1, t_2.$$

За таких умов рівняння фільтру Калмана матиме вигляд [197, 198]:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A\hat{x}(t) + H[y(t) - C\hat{x}(t)]. \quad (6.30)$$

Для усталеного режиму коефіцієнт посилення H фільтру визначається рівністю:

$$H = (D_{\tilde{x}} C^T + B \psi_v D^T) (\psi_{\omega} + D \psi_v D^T)^{-1}. \quad (6.31)$$

Матриця дисперсій помилки $D_{\tilde{x}}$ в сталому режимі задовольняє матричному алгебраїчному рівнянню:

$$\begin{aligned} & \tilde{A} D_{\tilde{x}} + D_{\tilde{x}} \tilde{A}^T - D_{\tilde{x}} C^T (\psi_{\omega} + D \psi_v D^T)^{-1} C D_{\tilde{x}} + \\ & + B \psi_v [E - D^T (\psi_{\omega} + D \psi_v D^T)^{-1} D \psi_v] B^T = 0 \\ & \tilde{A} = A - B \psi_v D^T (\psi_{\omega} + D \psi_v D^T)^{-1} C. \end{aligned} \quad (6.32)$$

Вирішення рівняння (6.32) - це позитивно певна матриця. На рис. 6.1 представлено структурну схему запропонованої приладової системи з фільтром Калмана для системи з одним входом і одним виходом, передавальна функція якої має вигляд:

$$W(s) = \frac{k(\tau s + 1)}{T s + 1}.$$

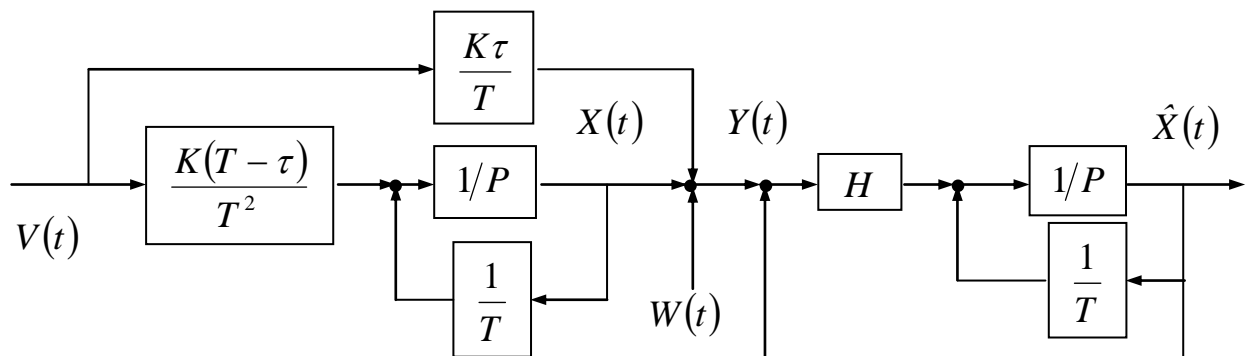


Рис.6.1. Структурна схема розробленої приладової системи з фільтром Калмана

Задано інтенсивність сигналу на вході $\Psi_v = 3$, інтенсивність шуму вимірювань $\Psi_\omega = 1$.

Рівняння стану для даного випадку запишемо у вигляді [197]:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{T}x + \frac{k(T-\tau)}{T^2}v,$$

$$y(t) = x(t) + \frac{k\tau}{T}v + \omega.$$

У відповідності з прийнятими позначеннями, маємо:

$$A = -\frac{1}{T}; \quad B = \frac{k(T-\tau)}{T^2}; \quad C = 1; \quad D = \frac{k\tau}{T}.$$

Тоді

$$\begin{aligned}
\tilde{A} &= A - B\psi_v D^T (\psi_\omega + D\psi_v D^T)^{-1} C = -\frac{1}{T} - \frac{k(T-\tau)3k\tau}{T^2 T} \left(1 + \frac{3k^2 \tau^2}{T^2}\right)^{-1} = \\
&= -\frac{3k^2 \tau + T}{3k^2 \tau^2 + T^2}; \quad C^T (\psi_\omega + D\psi_v D^T)^{-1} C = \frac{T^2}{3k^2 \tau^2 + T^2}; \\
\psi_v \left[E - D^T (\psi_\omega + D\psi_v D^T)^{-1} D\psi_v \right] &= 3 \left[1 - \frac{3k^2 \tau^2 T^2}{(3k^2 \tau^2 + T^2)} \right] = \frac{3T^2}{3k^2 \tau^2 + T^2}.
\end{aligned}$$

Рівняння для дисперсії помилки оцінювання [199] буде:

$$T^2 D_{\tilde{x}}^2 + 2(3k^2 \tau + T) D_{\tilde{x}} - \frac{3k^2 (T - \tau)^2}{T^2} = 0.$$

Його рішення, що задовольнятиме умову позитивної визначеності, матиме вигляд:

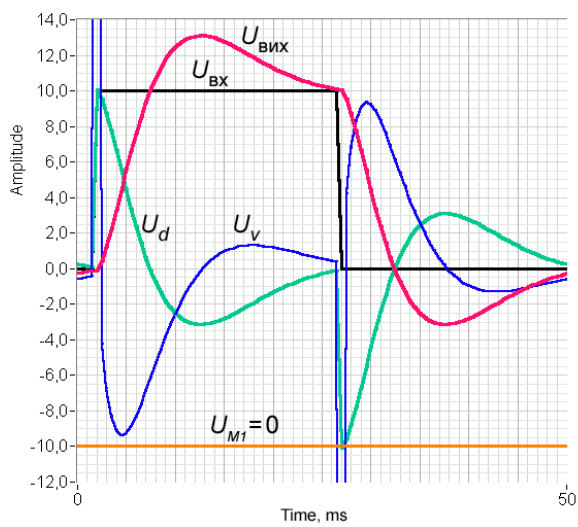
$$D_{\tilde{x}} = \frac{1}{T^2} \left[\sqrt{(3k^2 + 1)(3k^2 \tau^2 + T^2)} - (3k^2 \tau + T) \right]. \quad (6.33)$$

Коефіцієнт посилення фільтру Калмана визначатиметься за формулою:

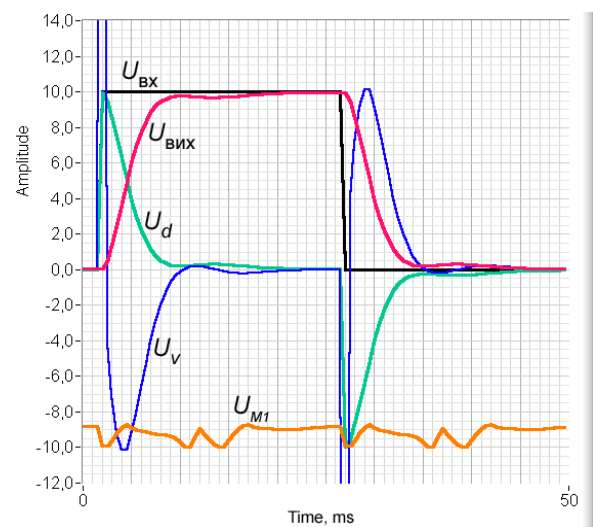
$$\begin{aligned}
H &= (D_{\tilde{x}} C^T + B\psi_v D^T) (\psi_\omega + D\psi_v D^T)^{-1} = \left[D_{\tilde{x}} + \frac{3k(T-\tau)k\tau}{T^2 T} \right] \frac{T^2}{(3k^2 \tau^2 + T^2)} = \\
&= \frac{1}{T(3k^2 \tau^2 + T^2)} \left[T \sqrt{(3k^2 + 1)(3k^2 \tau^2 + T^2)} - 3k^2 (\tau^2 + T^2) \right]. \quad (6.34)
\end{aligned}$$

Для дослідження динамічних характеристик структур замкнених систем автоматичного регулювання застосовано набір тестових сигналів, які імітували деформації контрольованих конструкцій різної конфігурації. Окрім прямокутної та трикутної форм сигналів введено такі періодичні сигнали (у порядку зростання ширини спектральної характеристики) (табл.6.1, рис.6.2 та додаток Є):

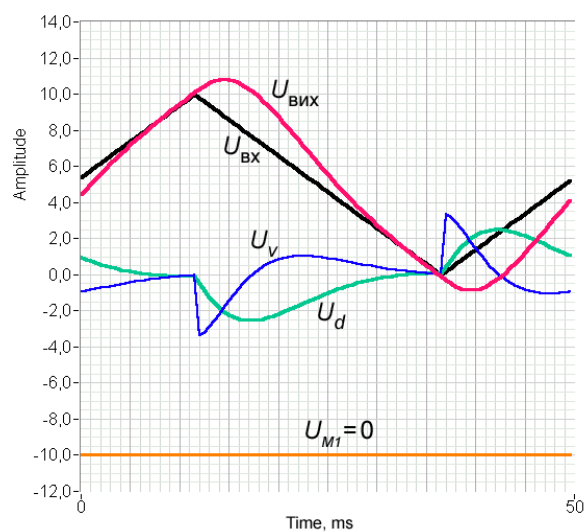
- гармонійний синусоїдний сигнал;
- комбінація непарних гармонік синусоїдного сигналу, кількість і вагові коефіцієнти яких обираються;
- складний сигнал з інвертованою в одному з напівперіодів синусоїдою;
- комбінація стрибка швидкості (трикутного сигналу) та координати (прямокутного) з протилежними та однаковими фазами.



а)



б)



в)

Рис. 6.2. Експериментальне визначення кількісних показників динамічних характеристик досліджуваної приладової системи:

а), б)- ступінчатий сигнал; в)- трикутний сигнал

Таблиця 6.1

Зведені дані результатів дослідження характеристик структур

№	Форма сигналу	Частота сигналу, Гц	Параметр	Базова	Запр.	Запр.	Ефект	Ефект
				структ.	7, а	7, б	7, а	7, б
				125/250	400/200	500/160	400/200	500/160
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Ступінчатий одноразовий (час спостереження – 100 мс)		Перерегулювання, %	30,1	4,2	1	7,17	30,1
			Початкова ділянка, мс	3,90	3,59	3,80	1,09	1,03
			Тривалість до 4,98%, мс	21,5	12,5	12,5	1,72	1,72
			Тривалість до 1,83%, мс	24,0	13,5	14,0	1,78	1,71
			СКВ	1,899	1,662	1,706	1,14	1,11
			СМВ	0,693	0,391	0,422	1,77	1,64
2	Трикутний сигнал	5	Тривалість процесу до 1,83% амплітуди вхідного впливу, мс	14,0	6,5	6,5	2,15	2,15
		10		16,5	8,0	8,0	2,06	2,06
		20		18,5	14,0	14,0	1,32	1,32
		5	СКВ	0,173	0,089	0,089	1,94	1,94
		10		0,489	0,251	0,253	1,95	1,93
		20		1,420	0,707	0,713	2,01	1,99
		40		3,352	1,844	1,861	1,82	1,80
		5	СМВ	0,068	0,028	0,028	2,43	2,43
		10		0,272	0,113	0,113	2,41	2,41
		20		1,089	0,448	0,450	2,43	2,42
		40		3,135	1,496	1,508	2,10	2,08
3	Синусоїдальний сигнал	5	СКВ	0,111	0,043	0,043	2,58	2,58
		10		0,442	0,164	0,164	2,70	2,70
		20		1,646	0,570	0,567	2,89	2,90
		40		4,089	1,739	1,733	2,35	2,36
		5	СМВ	0,100	0,039	0,039	2,56	2,56
		10		0,398	0,147	0,147	2,71	2,71
		20		1,481	0,509	0,507	2,91	2,92
		40		3,683	1,570	1,566	2,35	2,35
4	Синфазна комбінація стрибка швидкості та координати	10	СКВ	2,564	2,308	2,393	1,11	1,07
		20		3,888	3,547	3,689	1,10	1,05
		40		6,941	5,743	6,018	1,21	1,15
		10	СМВ	1,229	0,775	0,863	1,59	1,42
		20		2,441	1,813	1,977	1,35	1,23
		40		5,371	4,344	4,695	1,24	1,14
5	Протифазна комбінація стрибка швидкості та координати	10	СКВ	2,515	1,968	2,021	1,28	1,24
		20		3,756	2,587	2,633	1,45	1,43
		40		6,535	3,330	3,280	1,96	1,99
		10	СМВ	1,378	0,616	0,649	2,24	2,12
		20		2,983	1,131	1,144	2,64	2,61
		40		5,743	2,088	1,984	2,75	2,89
7	Однополярна напівсинусоїдна	10	СКВ	0,287	0,143	0,144	2,01	1,99
		20		0,813	0,399	0,402	2,04	2,02
		40		1,804	1,045	1,052	1,73	1,71
		10	СМВ	0,196	0,077	0,078	2,55	2,51
		20		0,682	0,274	0,275	2,49	2,48
		40		1,631	0,833	0,838	1,96	1,95
8	Непарні гармоніки синусоїдного сигналу	10	СКВ	1,400	0,649	0,651	2,16	2,15
		20		2,780	1,978	2,008	1,41	1,38
		10	СМВ	0,994	0,425	0,427	2,34	2,33
		20		2,380	1,402	1,421	1,70	1,67

Аналізуючи часові показники, наведені для двох типів сигналів – ступінчатого та трикутного, слід відзначити, що в першому випадку тривалість перехідного процесу скорочується в 1,71-1,78 разів. Оцінка часу виходу на синхронну швидкість при трикутному впливові дає більший виграш на середніх частотах – приблизно у 2,1 рази, і менший на високих – до 1,32 разів, оскільки абсолютний рівень зони контролю сигналу похибки у 1,83% був фіксованим на всіх частотах. Дещо коротшою стає початкова ділянка ступінчатого перехідного процесу, що пояснюється відповідним незначним розширенням смуги частот пропонованої системи. Це є поясненням причин невеликого зменшення СКВ у даному випадку (в 1,11-1,14 разів), адже внесок початкової ділянки з великою амплітудою в результат обчислення СКВ є найбільш вагомим завдяки високому значенню коефіцієнта форми такого сигналу, незважаючи на практичну відсутність ефекту перерегулювання. А от зменшення СМВ у 1,64-1,77 разів є цілком обґрунтованим саме завдяки подоланню останнього.

Для решти сигналів наведені лише амплітудні дані про рівень динамічної похибки виконання відповідного траєкторного руху різної складності. Задовільні результати отримані для трикутного впливу: у всьому частотному діапазоні СКВ зменшується у 1,8-2 рази, СМВ – у 2,1-2,4 рази. У випадку синусоїдного сигналу показники ефективності нового методу досягають однакових значень для СКВ і СМВ у 2,35-2,9 разів, що пояснюється гармонійною формою сигналу і лінійністю процесів, що відбуваються в системі.

За складних сигналів спостерігається менший виграш, зокрема для синфазної комбінації стрибка швидкості і координати (див. рис. В.5) вдається досягти виграшу у зменшенні СКВ лише у 1,1-1,2 та СМВ у 1,2-1,6 разів. Причини ті ж самі, що і за ступінчатого сигналу, хоча часові показники і форма перехідного процесу, проілюстровані діаграмами, слід вважати набагато кращими. Дещо інакше обстають справи зі схожим за формою, але розгорнутим навпаки у часі сигналом у вигляді протифазної комбінації

стрибка швидкості і координати – зворотній обхід тієї ж поверхні (рис. В.6.). Тепер виграш у зменшенні СКВ і СМВ складає 1,3-2 та 2-2,9 разів відповідно.

Непростий сигнал з широким спектром у вигляді послідовності напівперіодів синусоїди однакової полярності (рис. В.7) демонструє явні переваги запропонованої системи: СКВ зменшується у 1,7-2 рази, СМВ – у 2-2,5 рази.

І останній з періодичних сигналів – у вигляді комбінації обмеженої кількості непарних гармонік (з першої по дев'яту) синусоїдального сигналу з різними ваговими коефіцієнтами. І хоча форма такого впливу є провокаційною для обраного алгоритму побудови запропонованої системи, про що свідчить поява ділянки тимчасового зростання похибки, усереднені статистичні показники точності функціонування системи СКВ і СМВ дають кращий результат в порівнянні зі звичайною структурою у 1,4-2,1 та 1,7-2,3 разів відповідно.

Отже, встановлено певну залежність величини одержаного виграшу від конкретної форми регулярних вхідних сигналів. Результат не можна віднести на користь, або зарахувати в недоліки тієї чи іншої з порівнюваних структур. В цілому запропонована система має набагато вищі динамічні показники, а наявність таких форм сигналів, за яких виграш стає незначним, лише свідчить про достатню придатність саме таких сигналів для роботи звичайної системи. На користь запропонованих варіантів структурних рішень може бути відзначено суттєве покращення всіх форм процесів при їх дослідженні в часовій області в графічній формі.

Висновки по розділу 6

1. Запропоновано новий алгоритм оцінки результатів вимірювання, в основі якого покладено розрахунок мінімальної невизначеності вимірювання.
2. Отримано аналітичні вирази для непараметричної ідентифікації цільності розподілу імовірності при вимірюванні напружено- деформованого стану приладовою системою в складній постійно змінній завадовій обстановці.
3. Здійснено оцінку точності вимірювання інформаційного сигналу на фоні негаусової адитивної похибки, врахування якої призводить до підвищення точності механичних вимірювань більш ніж в 2,5 раза. Дослідженнями встановлено, що більша цільність розподілу імовірності адитивної похибки відрізняється від гаусової, тем більше отримуємо вииграш у точності вимірювань.
4. Визначено оптимальні оцінки стану вимірювання приладовою системою при впливі на неї випадкових збурень. Отримано рівняння фільтру Калмана, математичну модель для коефіцієнта посилення фільтру Калмана та рівняння для визначення матриці дисперсії помилки оцінювання.

ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У роботі вирішено важливу науково–прикладну проблему - розроблення науково – обґрунтованих методів та засобів вимірювання напружено-деформованого стану складних конструкцій, що досягається завдяки застосуванню системного підходу до розробки приладової системи вимірювання параметрів напружено – деформованого стану, що базується на інтелектуальному аналоговому інтерфейсі, а також удосконалення існуючих засобів та методів вимірювання деформації. Основними перевагами цих методів є високі точність вимірювання, швидкодія та завадозахищеність.

На основі виконаних досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Здійснено аналіз сучасного стану розвитку методів і засобів вимірювання напружено – деформованого стану, на основі якого розроблено нову класифікацію методів вимірювання напружено – деформованого стану та класифікацію факторів, що впливають на вимірювання напружено – деформованого стану.
2. Досліджено та ідентифіковано параметри математичних моделей вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій, що дало можливість удосконалити математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану та розробити методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію, та забезпечує підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.
3. Розроблено теоретичні основи побудови приладової системи для вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій на основі системного підходу та синтезу вимірювальної інформації про напружено – деформований стан складних конструкцій, що дають можливість визначити коригуючі параметри при використанні

поліноміальних залежностей від п'ятого до дев'ятого порядку.

4. Запропоновано нова технологію побудови приладів для вимірювання механічних величин роботи з інтелектуальними датчиками на базі TEDS, яка дає змогу підвищити метрологічні характеристики приладової системи в порівнянні з існуючими та розроблено метод оцінювання динамічних невизначеностей, який полягає у визначенні амплітудного значення динамічної невизначеності на основі сукупності амплітудо – частотної та фазо– частотної характеристики розробленого засобу вимірювання напруження та спектральної щільності сигналу, що дає змогу підвищити точність вимірювання.
5. Удосконалено методологію розв'язання проблеми підвищення точності вимірювання параметрів напружено – деформованого стану приладовою системою з покращеними метрологічними характеристиками, а саме підвищенням точності вимірювання, швидкодії та завадозахищеності на основі статистичних даних на основі методу автоматичної безрозривної корекції систематичної складової похибки дистанційного вимірювання напружено – деформованого стану на базі аналогових інтерфейсів для тензодатчиків, який, на відміну від існуючих, дозволяє більш ефективно коригувати похибки вимірювального каналу та розроблено метод корекції інструментальної випадкової похибки, зумовленої неідеальністю активних компонентів, опору ліній зв'язку та аналогових комутаторів при дистанційному вимірюванні тензодатчиком на основі математичних моделей метрологічних характеристик, які являють собою низькочастотні корельовані шуми.
6. Удосконалено математичну модель процесу дистанційного вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій та розроблено методику вимірювання деформацій та напружень з урахуванням структури сенсорного елемента датчика та температурного коефіцієнту опору тензорезисторів, що дає змогу здійснити ефективну лінеаризацію та корекцію, та забезпечує

підвищення точності вимірювання деформацій та напружень.

7. Удосконалено модель аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань сигналів тензодатчиків з автоматичною корекцією похибки під впливом різноманітних дестабілізуючих факторів, зорієнтований на дистанційне вимірювання параметрів напружено – деформованого стану за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків з підвищеними метрологічними та техніко – економічними характеристиками, структура яких включає вимірювальний підсилювач з диференційно- струмовими входами, що забезпечує підвищення коефіцієнту послаблення синфазних завад.
8. Набув подальшого розвитку метод і удосконалені засоби захисту вимірювального каналу параметрів напружено – деформованого стану від завад нормального виду, у тому числі за умови не лінійності функції перетворення аналогового інтерфейсу, котрий, на відміну від існуючих методів, забезпечує підвищення точності вимірювань та покращення завадо захищеності аналогового інтерфейсу в умовах апроксимації нелінійних функцій перетворення вимірювальних сигналів.
9. Удосконалено математичну модель на базі вимірювального підсилювача з диференціально – струмовими входами для роботи з одноелементним тензодатчиком, де один із подільників утворений резистивним тензодатчиком, а сам вимірювальний підсилювач включає операційний підсилювач першого каскаду, виконаний за схемою інвертора струму, що дає можливість зменшити інструментальні похибки, зумовлені неідеальністю операційних підсилювачів, ліній зв'язку та аналогових комутаторів.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьмич Л.В. Механічні впливи на надійність складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Технічні науки та технології. – 2018. – Вип. №4(14). – С. 28 – 33. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення / Держстандарт України. К.: 1994. -90 с.
3. ДСТУ 2470-94. Надійність техніки. Системи технологічні Терміни та визначення / Держстандарт України. К.: 1994. -24 с.
4. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення / Держстандарт України. К.: 1994. -38с.
5. ДСТУ-НБВ.1.2-13-2008. Система забезпечення надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDN)/ Мінрегіонбуд України. К.: 2009. -80с.
6. Надежность и эффективность в технике. Т.8 / Под ред. В.И.Кузнецова, Е.Ю.Барзиловича.М.: Машиностроение, 1990.
7. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги/ Держстандарт України. К.: 1994. -37с.
8. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Основні положення/Держстандарт України. К.: 1995. -41с.
9. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення/Держстандарт України. К.: 1996. -41с.
10. Гурин В.А. Надійність роботи засобів контролю і резервування закритого дренажу [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування. – 2002. – Вип. №4(17). – С. 54 – 60.
11. Гурин В.А. Аварійні ситуації на об'єктах водогосподарського меліоративного комплексу [Текст] / В.А. Гурин, Ю.П.Євреєнко, Л.В. Кузьмич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування. –2002. – Вип. №5(18).–С. 34–41.

12. Кузьмич Л.В. Прогнозування надійності роботи оглядового колодязя на осушувальній системі [Текст] / Л.В. Кузьмич // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: збірник наукових праць . – 2002. – Вип. №27. – С. 45 – 51.
13. Гурин В.А. Експлуатаційно – функціональна оцінка надійності роботи оглядових колодязів осушувальних систем [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Вісник Рівненського державного технічного університету. – 2002. – Вип. №3(16). – С. 54 – 60.
14. Гурин В.А. Експлуатаційно – функціональна оцінка надійності роботи гирлових споруд осушувальних систем [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування. – 2003.–Вип. №3(22).– С. 54–60.
15. Гурин В.А. Аварії (аварійні ситуації) на об'єктах осушувальних систем [Текст] / В.А. Гурин, Ю.П.Євреєнко, Л.В. Кузьмич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування. – 2003. – Вип. №4(23). – С. 15 – 21.
16. Гурин В.А. Аналіз надійності елементів гідромеліоративних систем [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2008. – Вип. №4(44). – С. 341– 347.
17. Кузьмич Л.В. Підвищення експлуатаційної надійності гирлових споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Меліорація і водне господарство. – 2010. – Вип. №98. – С. 345– 350.
18. Кузьмич Л.В. Експлуатаційні вимоги до забезпечення надійності осушувальних гідромеліоративних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. –2010. –Вип. №3-4. – С. 141 – 144.
19. Кузьмич Л.В. Оцінка надійності осушувальних систем на прикладі «Головинської» осушувальної системи, яка знаходиться в Рівненській області Костопільському району [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та

- природокористування: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. №4 (64). – С. 78– 84.
20. Кузьмич Л.В. Оцінка технічного стану елементів осушувальної системи «Марининська» Березнівського району Рівненської області / Л.В. Кузьмич, Ю.В. Шекель // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2014. – Вип. №4(68). – С. 34– 42.
 21. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. №2. – С. 180 – 183. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33.
 22. Кузьмич Л.В. Сучасні вимоги енергозберігаючої політики щодо механічних вимірювань витрат води та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2016. – Вип. №2(74). – С. 9 – 13.
 23. L.Kuzmych, V.Kvasnikov. Study of the durability of reinforced concrete structures of engineering buildings. Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 543, 2017, Pages 659-663 International Conference on Systems, Control and Information Technologies, SCIT 2016; Warsaw; Poland; 20 May 2016 through 21 May 2016; Code 187699.
 24. L. Kuzmych; O. Kobylanskyi; M. Duk. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085J (1 October 2018); doi: [10.1117/12.2501661](https://doi.org/10.1117/12.2501661).
 25. Кузьмич Л.В. Методи та засоби автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних конструкцій. [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков. – Київ : Інтерсервіс, 2019. – 147с. – ISBN 978-617-696-830-6.

26. V.Babich. Estimation of flexures of the reinforced concrete elements according to the National Ukrainian & European standards [Text] / V.Babich, V.Dovbenko, L.Kuzmych, T.Dovbenko // MATEC Web of Conferences.Vol. 116, 02005 (2017), DOI: 10.1051/matecconf/201711602005.
27. Кузьмич Л.В. Вимірювання механічних величин при обліку водної та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вимірювальна та обчислювальна техніка і технологічних процесах. – 2016. – Вип. №3(56). – С. 56 – 59.
28. L.V.Kuzmich, Y.S.Tsekhmaystruk. Modern state of mechanical deformation measurement of complex technical systems [electronic resource] / Materials of the XIII international scientific and technical conference "AVIA - 2017". - Mode of access to the site: <http://avia.nau.edu.ua/avia2017>.
29. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено – деформованого стану складних конструкцій в штатних і аварійних ситуаціях / Л.В.Кузьмич // Вісник інженерної академії України. 2017. №3. С.154-157.
30. Кузьмич Л.В. Аналіз наявних методів та засобів вимірювання механічних напружень складних технічних систем на прикладі гідротехнічних споруд / Л.В.Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2017. – №5. – С. 89-93.
31. Кузьмич Л.В. Сучасний стан засобів та методів контролю деформацій та механічних напружень складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Четверта міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017), 31 жовтня – 2 листопада, 2017р. Збірник тез доповідей. – Вінниця: ПП «ТД»Едельвейс І К», 2017. – С.106.
32. Кузьмич Л.В. Оцінювання результатів вимірювання механічних величин в умовах невизначеності [Текст] / Л.В. Кузьмич // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне

- забезпечення якості технологічних процесів та систем», Том 2, 24 - 27 квітня 2017 р., м. Чернігів. – С.147.
33. Федоров І.Б. Оцінювання вимірювання інтелектуальними приладовими системами в умовах невизначеності [Текст] / І.Б. Федоров, Л.В. Кузьмич // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2017). Десята міжнародна науково – практична конференція 16-17 травня 2017 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2017. – С.115-117.
 34. Кузьмич Л.В. Сучасний стан вимірювання механічних деформацій складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич, Ю.С. Цехмейструк. // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2017” , 19-21 квітня 2017р., Київ, 2017. – С.268-272.
 35. Кузьмич Л.В. Аналіз сучасних засобів та методів вимірювання деформацій і напруження для контролю міцності конструкцій гідротехнічних споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірка матеріалів міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон, Україна: Вид-во ПП «ЛТ - Офіс», 2017.- С.146-149.
 36. Анализ надежности элементов гидромелиоративных систем и их усовершенствование [Текст] / В.А. Гурин, Л.В. Кузьмич // Материалы международной научно – практической конференции «Социально – экономические и экологические проблемы сельского и водного хозяйства». — М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2010. — С.204-211.
 37. Кузьмич Л.В. Організаційно – технічні заходи підтримання в справному стані гідромеліоративних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції – Випуск 9. - Херсон: РВВ "КОЛОС", 2015. – С. 120.
 38. L.Kuzmich. Measurement of mechanical quantities of water flows in the space heating regardless of the type of heat pipelines of engineering systems [Текст] / L.Kuzmich, A.Kuzmich // Інформаційно – обчислювальні технології, автоматика та електротехніка. Міжнародна науково – практична конференція молодих науковців, аспірантів та студентів

- (ІТАЕ – 2016) 10-11 листопада 2016 року. Матеріали конференції. Рівне, НУВГП, 2016. . – С.282-283.
39. Кузьмич Л.В. Сучасний стан механічних вимірювань витрат води та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2016). Дев'ята міжнародна науково – практична конференція 17-18 травня 2016 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2016. – С.139-140.
 40. Кузьмич Л.В. Проблеми комерційного обліку енергоресурсів України (на прикладі вимірювання механічних величин в обліку водної та теплової енергії) [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П.Квасніков, Я.С.Довженко // X міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка (МЕТРОЛОГІЯ – 2016)», Харків . – С. 101.
 41. L.Kuzmych. Features of measuring the amount of energy of water-heat [Текст] / L.Kuzmych,. M.Kataeva // Proceedings the deventh world congress “Aviation in the XXI-st century”Safety in aviation and dpace technologies”, September 19-21, 2016, KYIV, UKRAINE. – К., 2016. – С.371 – 374.
 42. Кузьмич Л.В. Аналіз сучасних інтелектуальних систем вимірювання механічних величин водних ресурсів України [Електронний ресурс] / Л.В. Кузьмич, В.Г. Павлюк // Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 23 листопада 2016 р. – К: НУХТ, 2016. — Режим доступу: <http://nuft.edu.u8a/page/view/konferentsii>
 43. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. №2. – С. 180 – 183. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-28-33.
 44. Кузьмич Л.В. Сучасні вимоги енергозберігаючої політики щодо

- механічних вимірювань витрат води та теплової енергії [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2016. – Вип. №2(74). – С. 9 – 13.
45. Кузьмич Л.В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2016. – Вип. №1(8). – С. 95 – 99.
 46. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено – деформованого стану складних конструкцій в штатних і аварійних ситуаціях. [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. №3. – С. 154 – 157.
 47. Кузьмич Л.В. Методи обґрунтування структурно-функціонального аналізу та принципи побудови системи діагностування напружено - деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2017. – Вип. №2(11). – С. 85 – 89.
 48. Кузьмич Л.В. Оцінка залишкового ресурсу складних технічних конструкцій в умовах малоциклової та багатоциклової втоми [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць. – 2018. – Вип. №1(81). – С. 205 – 211. <https://doi.org/10.31713/vt1201822>.
 49. Кузьмич Л.В. Аналіз наявних методів та засобів вимірювання механічних напружень складних технічних систем на прикладі гідротехнічних споруд [Текст] / Л.В. Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2017. – Вип. №5-1(67). – С.89-93.
 50. Кузьмич Л.В. Підходи щодо оцінювання ресурсу технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип.

№2(82). – С. 204 – 207. DOI:[https://doi.org/10.26642/tn-2018-2\(82\)-204-207](https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-204-207)

51. Орнатський Д.П. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків [Текст] / Д.П.Орнатський, Л.В.Кузьмич, В.П.Квасніков. // Метрологія та прилади. – 2018. – Вип. №6(74). – С. 9 – 12.
52. Орнатський Д.П. Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками [Текст] / Д.П.Орнатський,Л.В.Кузьмич, В.П.Квасніков // Метрологія та прилади. . – 2019. – Вип. №1(75). – С. 31 – 36.
53. Кузьмич Л.В. Розробка способу та засобу вимірювань напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчика [Текст] / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – Вип. №1. – С. 69 – 74.
54. Кузьмич Л.В. Синтез методу вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В.Кузьмич // Метрологія та прилади. – 2019. – Вип. №3(77). – С. 12 – 18.
55. Экспериментальная механика [Текст] : монография в 2 кн: Кн. 1 / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
56. Серьезнов, А. Н. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте [Текст] / А. Н. Серьезнов, А. К. Шашурин. – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 200 с.
57. Digital's Compensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern. Erb. K., Fisher P. "Bulletin SEV/VSE", 1989, 80, №7, 8, 365-368.
58. Классен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике [Текст] / К. Б. Классен. - М.: Постмаркет, 2000. - 352 с.
59. Кузьмич Л.В. Оптимізація вимірювальних засобів напружено – деформованого стану за допомогою тензодатчиків [Текст] / Л.В.

- Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // *Авиационно- космическая техника и технология*. – 2019. – Вип. №3(155). – С. 50 – 57.
60. Кузьмич Л.В. Оптимізація роботи приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В.Кузьмич // *Механіка гіроскопічних систем*. – 2019. – Вип. №. 37– С. 112 – 120.
 61. Кузьмич Л.В. Аналіз напружено – деформованого стану складних конструкцій в аварійних ситуаціях [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Вісник Інженерної академії України*. – 2018. – Вип. №2. – С. 61 – 64.
 62. Кузьмич Л.В. Методика оцінювання ресурсу складних технічних об'єктів [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: збірник наукових праць*. – 2018. – Вип. №2(82). – С. 240– 248.
 63. Кузьмич Л.В. Сценарії виникнення та розвитку небезпечних станів складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2018. – Вип. №62. – С. 35 – 40.
 64. Кузьмич Л.В. Аналіз вичерпування ресурсу складних потенційно небезпечних інженерних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Вісник Інженерної академії України*. – 2018. – Вип. №3. – С. 184 – 187.
 65. Кузьмич Л.В. Комплексний аналіз динаміки навантаження та напружено – деформованих станів складних технічних систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Вісник Інженерної академії України*. – 2018. – Вип. №4. – С. 47 – 50.
 66. Кузьмич Л.В. Обробка результатів вимірювання механічних величин інтелектуальними приладовими системами (в умовах невизначеності) [Текст] / Л.В. Кузьмич // *Вісник Інженерної академії України*. – 2019. – Вип. №.2 – С. – .
 67. Патент №134572 (Україна), МПК G01R 21/00. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та

- резистивних тензодатчиків [Текст] / В.П.Квасніков, Л.В.Кузьмич, Д.П.Орнатський. – Реєстрац. номер заявки u 201812440. Опубліковано в бюлетені №10 від 27.05.2019.
68. Кузьмич Л.В. Обґрунтування залишкового ресурсу складних технічних конструкцій в умовах тривалої експлуатації [Текст] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич. // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018). XI міжнародна науково – практична конференція 22-23 травня 2018 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2018. – с.133-135.
 69. Кузьмич Л.В. Підвищення надійності, покращення методів та засобів контролю напружено – деформованого стану металевих конструкцій гідротехнічних споруд [Електронний ресурс] / Л.В. Кузьмич, А.А. Кузьмич. // Матеріали IV міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2017 р.– К: НУХТ, 2017. - с.140-141 — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>
 70. Кузьмич Л.В. Магнітопружна пам'ять магнетиків та її використання для вимірювання силового впливу на сталеві деталі складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич // Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні збройних сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель. Матеріали науково-практичної конференції 30 листопада 2017р, Київ. — с.42-43.
 71. Кузьмич Л.В. Непараметрична ідентифікація щільності розподілу вірогідності в складній постійно змінній завадовій обстановці [Текст] / Л.В. Кузьмич // Наукове видання VIII міжнародної науково-практичної конференції комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем 10 - 12 травня 2018 р., том 2, м. Чернігів, ЧНТУ. — с.178.

72. Кузьмич А.А. Принципи побудови системи діагностування напружено-деформованого стану складних конструкцій [Текст] / А.А. Кузьмич, Л.В. Кузьмич // Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій: матеріали міжнародної наукової конференції. – Рівне, 2018. – с.199-200.
73. Кузьмич Л.В. Довговічність складних технічних конструкцій при багатоцикловій та малоцикловій втомі [Текст] / Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков, Ю.М. Сковородкіна // XI міжнародна науково – технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» 9–11 жовтня 2018 року. Тези доповідей. Харків, 2018. – С.97.
74. L.V.Kuzmich. The methods of functional analysis and the principles of diagnostic of stress-deformed condition of construction structures [Текст] / L. V. Kuzmich // VIII Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології», Київ, 2018. – с.2.4.1-2.4.4.
75. Кузьмич Л.В. Моделирование аналогового интерфейса для дистанционных измерений [Електронний ресурс] / Л.В. Кузьмич, Д.П.Орнатський, В.П.Квасников // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : VI международная научно-техническая интернет-конференция, 17-18 ноября 2018 г. — Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/49933>
76. L.V.Kuzmich. The estimation of the parameters of the stress - strain state of complex technical constructions [Текст] / L.V.Kuzmich // Proceedings the Fourteenth International Scientific Conference. “AVIa-2019”, April 23-25, 2019. Kyiv. — P.4.27 - 4.29.
77. Кузьмич Л.В. Оптимізація роботи модуля приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану складних технічних об'єктів та систем [Текст] / Л.В. Кузьмич // XII міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірка доповідей. К.:НТУУ «КПІ імені І. Сікорського», 2019.— с.95 - 102.

78. Кузьмич Л.В. Теоретичні основи побудови приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій [Текст] / Л.В. Кузьмич, П.Л. Ігнатенко // Наукове видання IX міжнародної науково-практичної конференції комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем 14 - 16 травня 2019 р. м. Чернігів том 2, ЧНТУ. — с.230 - 231.
79. L.V.Kuzmych. Development of the intelligent instrument system for monitoring the parameters of the stress - strain state of complex structures [Текст] / L. V. Kuzmych // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2019: тези доповідей Чотирнадцятої міжнародної науково – практичної конференції (Чернігів, 24-26 червня 2019 р.). – Чернігів: ЧНТУ. — с.79-82.
80. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О. Оценка живучести сложных технических систем. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2009. — № 3. — С. 47—66.
81. Фролов К.В., Махутов Н.А. Проблемы безопасности сложных технических систем / К.В.Фролов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1992. – №5. – С. 3-11.
82. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н.А.Махутов. – Новосибирск: Наука.2008. – 528с.
83. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях / Н.А.Махутов. – Новосибирск: Наука.2008. Часть 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
84. Морозов Е.М., Левин В.А., Вершинин А.В.. Прочностный анализ. Фидесис в руках Инженера / Е.М.Морозов. - М. ЛЕНАНД. 2015. – 408с.
85. Makhutov N.A., Reznikov D.O. A comperetive assessment of specification-based and risk- management- based approaches to the security assessment of

- complex technical systems// Journal of Machinery, Manufacture and Reliability. 2011. V.40. №6. P. 579-584.
86. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки / Н.А.Махутов. Новосибирск: Наука. 2017. – 724 с.
 87. Гаденин М.М. Исследование повреждаемости и долговечности при одно – и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов / М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017, т.83, №6. С.44-52.
 88. Ching J. Equivalence between reliability and factor of safety. Probabilistic Engineering Mechanics. 2009/ 24 (2). P.159-171.
 89. Шатов М.М., Чернявский А.О. Методика назначения предельной вероятности отказа / М.М. Шатов // Проблемы машиностроения и надежности машин 2013. №1. С. 51-55.
 90. Коротких Ю.Г., Бех О.И. Уравнения механики поврежденной среды для циклических неизотермических процессов деформирования [Текст] / Ю.Г.Коротких // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз.межвуз.сб. / Горьк.ун-т.- 1989. С.96-100.
 91. Маковкин Г.А., Юдников С.Г., Нестеров А.П. Оценка остаточной усталостной долговечности путем математического моделирования процессов повреждения. Текст] / Г.А.Маковкин // «Промышленная безопасность – 2005». Сб.статей. исследование технического состояния зданий и сооружений в процессе экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов. Н.Новгород: Изд. ННГАСУ, 2005. С.66-68.
 92. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S., Shishulin D.N. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions // J. Strength of Materials. – 2011. – Vol. 436, No. 4. – P. 471–485.

93. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. [Текст] / Д.А.Казаков – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 1994. – 225с.
94. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Шишулин Д.Н. Экспериментальные методы определения материальных параметров теории пластического течения [Текст] / И.А.Волков // Прикладная механика и технология машиностроения: сб. науч. тр. / под ред. В.И. Ерофеева, С.И. Смирнова и Г.К.Сорокина –Н. Новгород: Интелсервис, 2010.– №2(17).–С.189–203.
95. Большухин М.А. Зверев Д.Л., Кайдалов В.Б. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоцикловой и многоцикловой усталости [Текст] / М.А.Большухин // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2010. – № 72. – С. 28–35.
96. Biondini F., D. Frangopol. (Ed.) Life-Cycle Civil Engineer-ing. Taylor & Francis Group, London, UK. 970, 2008.
97. Frangopol D., Kawatani M., Chul-Woo Kim (Ed) Reliabil-ity and Optimization of Structural Systems: Assessment, Design and Life-Cycle Performance. 2007 Taylor & Francis Group, London, UK, P.269.
98. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О., Куксова В.И. Идентификация определяющих параметров угроз, уязвимости и защищенности критически важных объектов по отношению к привалирующим угрозам природного техногенного и террористического характера. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2008. — № 2. — С. 34—41.
99. Adams, D. Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications / D. Adams. – John Wiley & Sons, Ltd., 2007. – 460 p.

100. Яблонский С. В. Некоторые вопросы надежности и контроля управляющих систем / С. В. Яблонский // Математические вопросы кибернетики. – 1988. – № 1. – С. 5–25.
101. Н. Бурау. Структурно-функціональний синтез систем діагностики конструкцій в експлуатації / Н. Бурау, О. Павловський, Д. Шевчук // Вісник ТНТУ. – 2013. – Том 72. – № 4. – С.77-86.
102. Понтрягин Л. С. Обобщения чисел / Л.С. Понтрягин. – М., Наука, 1986. – 120 с.
103. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Ключев, П. П. Пархоменко и др.: Под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
104. Вальков В. М. Микроэлектронные управляющие вычислительные комплексы: Системное проектирование и конструирование / В.М. Вальков. – Л.: Машиностроение, 1990. – 221 с.
105. Fuels Spills – An Automated Early-Warning System / O. Kuzko, V. Lytvynov, N. Bouraou, Y. Zukovsky, O. Kyrychuk // COMNAP-XXIV Science Symposium Proceedings, Portland, USA, 2012. – P. 77 – 85.
106. Van der Schaf A. J. On Realization of Nonlinears Systems Described by Higher – Order Differential Equations // Matematical Systems Theory. 1987. – Vol. 19, pp. 239–275.
107. Soloman, S. Sensors Handbook / S. Soloman. – McGraw-Hill Inc., 2010. – 1424 p.
108. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно – измерительных систем. [Текст] / О.Н. Новоселов – М.: Машиностроение, 1991. – 311 с.
109. 2. Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. [Текст] / А.С. Шалыгин – Л.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
110. 3. Петров Е.П., Частиков А.В., Прозоров Д.Е. Практикум по основам статистической радиотехники: Учеб. пособие. [Текст] / Е.П. Петров –

- Киров: ВятГТУ, 2000. -108 с.
111. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України № 113/98-ВР від 11.02.1998» (зі змінами, внесеними згідно із Законом № 762-IV від 15.05.2003, в редакції Закону № 1765-IV від 15.06.2004). [Електронний ресурс]. – Режим доступу : zakon.rada.gov.ua/laws/show/113/98-вр.
 112. Захаров И.П. Обработка результатов измерений: Уч. пособие – Харьков:Изд-во Нац. уни-та внутренних дел, 2002. - 125с.
 113. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 320с.
 114. Чалый В.П. Неопределенность и погрешность, их сходство, различие и употребление в разных метрологических процедурах / В.П. Чалый // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. – вип. 7(56). Невизначеність вимірювання: наукові, нормативні та прикладні аспекти, 2006. – С. 82–86.
 115. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях : [учеб. пособие] / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков, Консум, 2002–256 с.
 116. Мержиєвська В.В. Оцінювання невизначеності вимірювання параметрів автомобільних двигунів під час стендового випробовування / В.В. Мержиєвська // Системи обробки інформації. – Харків. – 2008.
 117. Паракуда В.В. Еволюція вимог до метрології / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалий // Український метрологічний журнал. – 2005. – №3. – С. 56–60.
 118. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.
 119. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT).

120. Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань: Технічний звіт EUROLAB № 1/2006 // Переклад з англ. та науково-технічне редагування: А.В. Абрамов; А.М. Коцюба, В.М. Новіков. – Київ, Євролаб-Україна, 2008. – 51 с.
121. Аш Дж. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн.1. / пер. с франц. / [Текст] / Дж. Аш - М.: Мир, 1992. - 480 с. (Ash J. Datchiki izmeritelnih sistem: v 2 knigah. Kn.1. – М.: Mir, 1992.- 480 p.)
122. Патент на корисну модель № 109796, кл. G01R21/00, 2016, Бюл. №17. (Patent №109796, G G01R21/00, 2016, Bul. №17)
123. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений [Текст] / К.Л.Куликовский. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448с.
124. National Instruments, SCXI Universal Strain Grade Input: SCXI-1540. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc293_ETC_196.pdf.
125. SCXI-1126. User Manual. Eight-Channel Isolated Frequency Input Module for Signal Conditioning. National Instruments Corporation. 1998-2003.
126. Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals [Electronic resource] / Publish Date: Mar 11, 2014. -Available at: <http://www.ni.com/white-paper/3344/en/>
127. Уикзер, Дж. Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы [Текст] / Дж. Уикзер // Датчики и системы. - 2002. - № 10. - С. 50-55.
128. Rus, G. Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test [Text] / G. Rus, S. Y. Lee, S. Y. Chang, S. C. Wooh // International Journal for Numerical Methods in Engineering. - 2006. - Vol. 68, Issue 7. - P. 707-727. doi: 10.1002/nme.1720.
129. Harada, T. Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate [Text] / T. Harada, N. Ishikawa, T. Kanda, K. Suzumori, Y. Yamada, K. Sotowa // Sensors and Actuators A: Physical. - 2009. - Vol. 155, Issue 1. - P. 168-174. doi: 10.1016/j.sna.2009.08.007.

130. Schroder, A. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization [Text] / A. Schroder, J. Rautenberg, B. Henning // Physics Procedia. - 2010. - Vol. 3, Issue 1. - P. 10031009. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.
131. Кузьмич Л.В. Цифрова корекція похибки вимірювання тензодатчика [Текст] / Л.В. Кузьмич, Д.П. Орнатський, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – Вип. №2. – С. 69 – 74.
132. Шрюфер Е. Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів: Підручник / За ред. В.П. Бабака. К.: Либідь, 1992. – 296 с.
133. Слізков А.М. Оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних вимірювань [Текст] / А.М. Слізков, Л.А. Дмитренко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – №2. – С. 219 – 224.
134. Мержиєвська В.В. Засади оцінювання невизначеності результатів випробування транспортних засобів та їхніх складових частин [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.sites.google.com/site/yakavoska/articles/zasadi>
135. Горелов Г. В., Фомин А. Ф., Волков А. А., Котов В. К. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте: Учебник. – М.: Транспорт, 2002.
136. Фомин А. Ф., Новоселов О. Н. Адаптивные и робастные амплитудные подавители помех//Измерительная техника. – 1992. – № 10.
137. Фомин А. Ф. Информационно-телекоммуникационные системы и сети (эволюция, современность, будущее). – М.: МИИТ, 2010.
138. Цифровые информационно-измерительные системы: Теория и практика/Под редакцией А. Ф. Фомина, О. Н. Новоселова. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
139. Фомин А. Ф. Поездная радиосвязь и борьба с помехами//ВКСС, Connect. – 2007. – № 6.

140. Цыпкин А. З. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984.
141. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
142. Квасніков В. П. Вимірювання деформацій і напружень в об'єктах досліджень / В.П. Квасніков, Т.І. Ганєва // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2015): тез. доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18-19 травня 2015 р. – Київ, НАУ, 2015. – С. 90-92.
143. Bhatt R. N. Stress dependence of the metal-insulator transition in doped semiconductors / R. N. Bhatt // Phys. Rev. – 1982. – Vol. B26, № 2. – P. 1082-1085.
144. Квасніков В. П. Чутливі елементи сенсорів деформації в складних технічних системах / В.П. Квасніков, Т.І. Ганєва // Вісник Інженерної Академії України. – Київ, 2014. - № 3-4. – С. 65-67.
145. Квасніков В. П. Шляхи підвищення точності вимірювання деформації та механічних напружень / В. П. Квасніков, Т. І. Ганєва // Метрологія та прилади. – Київ, 2015. - № 6. – С. 15-18.
146. Тензометрия в машиностроении: справочное пособие. / под ред. канд. техн. наук Р. А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
147. Keil S. Beanspruchungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen / S. Keil // Stress analysis using strain gages – Cuneus Verlag, 1995. – 353 p.
148. Fuhr, P.L.; Huston, D.R.; Nelson, M.; Nelson, O.; Hu, J.; Mowat, E. Fiber optic sensing of a bridge in Waterbury, Vermont. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 1999, 10, 293–303.
149. Tennyson, R.C.; Mufti, A.A.; Rizkalla, S.; Tadros, G.; Benmokrane, B. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. Smart Struct. Syst. 2001, 10, 560–573.
150. Chan, T.H.T.; Yu, L.; Tam, H.Y.; Ni, Y.Q.; Liu, S.Y.; Chung, W.H.; Cheng, L.K. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing

- Ma bridge: Background and experimental observation. *Eng. Struct.* 2006, 28, 648–659.
151. Li, H.; Ou, J.P.; Zhao, X.F.; Zhou, W.S.; Li, H.W.; Zhou, Z. Structural health monitoring system for the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge. *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 2006, 21, 306–317.
 152. Jiang, G.L.; Dawood, M.; Peters, K.; Rizkalla, S. Global and local fiber optic sensors for health monitoring of civil engineering infrastructure retrofit with FRP materials. *Struct. Health Monit.* 2010, 9, 309–322.
 153. Casas, J.R.; Cruz, P.J.S. Fiber optic sensors for bridge monitoring. *J. Bridge Eng.* 2003, 8, 362–373.
 154. Xiong, W.; Cai, C.S.; Kong, X. Instrumentation design for bridge scour monitoring using fiber Bragg grating sensors. *Appl. Opt.* 2012, 51, 547–557.
 155. Zhang, W.; Gao, J.Q.; Shi, B.; Cui, H.L.; Zhu, H. Health monitoring of rehabilitated concrete bridges using distributed optical fiber sensing. *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 2006, 21, 411–424.
 156. Kister, G.; Badcock, R.A.; Gebremichael, Y.M.; Boyle, W.J.O.; Grattan, K.T.V.; Fernando, G.F.; Canning, L. Monitoring of an all-composite bridge using Bragg grating sensors. *Constr. Build. Mater.* 2007, 21, 1599–1604.
 157. Kister, G.; Winter, D.; Badcock, R.A.; Gebremichael, Y.M.; Boyle, W.J.O.; Meggitt, B.T.; Grattan, K.T.V.; Fernando, G.F. Structural health monitoring of a composite bridge using Bragg grating sensors. Part 1: Evaluation of adhesives and protection systems for the optical sensors. *Eng. Struct.* 2007, 29, 440–448.
 158. Costa, B.J.A.; Figueiras, J.A. Fiber optical based monitoring system applied to a centenary metallic arch bridge: Design and installation. *Eng. Struct.* 2012, 44, 271–280.
 159. Rodrigues, C.; Cavadas, F.; Felix, C.; Figueiras, J. FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge. *Eng. Struct.* 2012, 44, 281–290.

160. Barbosa, C.; Costa, N.; Ferreira, L.A.; Araujo, F.M.; Varum, H.; Costa, A.; Fernandes, C.; Rodrigues, H. Weldable fibre Bragg grating sensors for steel bridge monitoring. *Meas. Sci. Technol.* 2008, 19, 125305.
161. Surre, F.; Sun, T.; Grattan, K.T. Fiber optic strain monitoring for long-term evaluation of a concrete footbridge under extended test conditions. *IEEE Sens. J.* 2013, 13, 1036–1043.
162. Fuhr, P.L.; Huston, D.R. Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors. *Smart Struct. Syst.* 1998, 7, 217–228.
163. Lin, Y.B.; Chen, J.C.; Chang, K.C.; Chern, J.C.; Lai, J.S. Real-time monitoring of local scour by using fiber Bragg grating sensors. *Smart Struct. Syst.* 2005, 14, 664–670.
164. Sigurdardottir, D.H.; Glisic, B. On-site validation of fiber-optic methods for structural health monitoring: Streicker Bridge. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 2015, 5, 529–549.
165. Tung, S.; Yao, Y.; Glisic, B. Sensing sheet: The sensitivity of thin-film full-bridge strain sensors for crack detection and characterization. *Meas. Sci. Technol.* 2014, 25, 075602.
166. Tung, S.T.; Glisic, B. Sensing sheet: The response of full-bridge strain sensors to thermal variations for detecting and characterizing cracks. *Meas. Sci. Technol.* 2016, 27, 124010.
167. Yau, M.H.; Chan, T.H.T.; Thambiratnam, D.; Tam, H.Y. Static vertical displacement measurement of bridges using fiber Bragg grating (FBG) sensors. *Adv. Struct. Eng.* 2013, 16, 165–176.
168. Xiao, F.; Chen, G.S.; Hulsey, J.L. Monitoring bridge dynamic responses using fiber Bragg grating tiltmeters.
169. *Sensors* 2017, 17, 2390.
170. Ciężczyk, S.; Kisała, P. Inverse problem of determining periodic surface profile oscillation defects of steel materials with a fiber Bragg grating sensor. *Appl. Opt.* 2016, 55, 1412–1420.

171. Huang, G.; Wei, C.; Chen, S.; Yang, G. Reconstruction of structural damage based on reflection intensity spectra of fiber Bragg gratings. *Meas. Sci. Technol.* 2014, 25, 125109
172. Kerrouche, A.; Leighton, J.; Boyle, W.J.O.; Gebremichael, Y.M.; Sun, T.; Grattan, K.T.; Taljsten, B. Strain measurement on a rail bridge loaded to failure using a fiber Bragg grating-based distributed sensor system. *IEEE Sens. J.* 2008, 8, 2059–2065.
173. International Institute of Welding (IIW). *Fatigue Analysis of Welded Components—Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach*; International Institute of Welding: Cambridge, UK, 2006.
174. Wei, C.L.; Lai, C.C.; Liu, S.Y.; Chung, W.H.; Ho, T.K.; Tam, H.Y.; Ho, S.L.; McCusker, A.; Kam, J.; Lee, K.Y. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. *IEEE Sens. J.* 2010, 10, 1905–1912.
175. Downing, S.D.; Socie, D.F. Simple rainflow counting algorithms. *Int. J. Fatigue* 1982, 4, 31–40.
176. Xia, H.W.; Ni, Y.Q.; Wong, K.Y.; Ko, J.M. Reliability-based condition assessment of in-service bridges using mixture distribution models. *Comput. Struct.* 2012, 106–107, 204–213.
177. McLachlan, G.J.; Peel, D. *Finite Mixture Models*; Wiley: New York, NY, USA, 2000.
178. Holland, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial System*; The University of Michigan Press: Ann Arbor, MI, USA, 1975.
179. Paulo, P.; Branco, F.; de Brito, J.; Silva, A. Buildings life —The use of genetic algorithms for maintenance plan optimization. *J. Clean. Prod.* 2016, 121, p. 84–98.
180. Kottegoda, N.T.; Rosso, R.S. *Probability, Statistics, and Reliability for Civil and Environmental Engineers*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1997.

181. Квасніков В.П. Підвищення точності координатних вимірювань великогабаритних деталей // Праці IV Української конференції “Автоматика – 97”.-Черкаси:1997.- С. 41-42.
182. Данеев А.В. Система искусственного интеллекта автоматизации процессов автоматического контроля // Асимптотические методы в задачах аэродинамики.-Иркутск.-Изд-во ИПИ, 1994.-С. 98-129.
183. Тихонов А.Н., Гончаровский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация.-М.: Наука, 1983.-326 с.
184. Цветков Э. И. Методические погрешности статистических измерений.- Л.: Энергоатомиздат, 1984.-144 с.
185. Черпаков Б.И. Судов Е.В. Первый конгрес по автоматической метрологии // Станки и инструмент.-1996.-№3,4,5.
186. Сельченков В.И. Математическое описание входящих и выходящих процессов объективного контроля.-М.: Изд-во вузов «Прибор», 1999.-128 с.
187. Шапот М.Д. Статистические и динамические экспертные системы.-М.: Финансы и статистика, 1996.-304 с.
188. Теория и метрология измерительных информационных систем. Сборник научных трудов. -Львов: Изд-во НПО “Система”, 1983.-132 с.
189. Квасников В.П., Рудницкий В.Н. Математическая модель трехкоординатной информационно-измерительной системы механических величин // Труды ЦНИИ ВВТ– 2003- №1.- С.41-44.
190. Квасніков В.П. Побудова фільтра Калмана для трикоординатної ІВС механічних величин // Праці IV міжнародної науково-практична конференція “Гіротехнології, навігація, управління рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки”.-Київ.-2003.-С.160-163.
191. Квасніков В.П. Особливості метрологічної атестації трикоординатних ІВС механічних величин // Праці міжнародної науково - технічної конференції “Сучасні прилади, матеріали і технології для технічної діагностики і неруйнівного контролю промислового обладнання” - Харків: - 1999. - С.

59-60.

192. Квасніков В.П. Купко В.С. Аналіз впливу температурних коливань на точність функціонування ІВС механічних величин // Праці міжнародної конференції “Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики.-Ялта.-2000.- С. 51.
193. Квасніков В.П. Купко В.С. Методика автоматизованої повірки ІВС механічних величин // Праці міжнародної конференції “Система метрологічного забезпечення на Україні”.-Київ.-2000.- С. 54-55.
194. Бельюков А.Н., Солодихин Г.М., Солодовников В.А. Натурный эксперимент. Информационное обеспечение экспериментальных исследований / Под ред. Н.И. Баклашова.-М.: Радио и связь, 1982.-292 с.
195. Горовой А.А. Микропроцессорный агрегатный комплекс для диагностики технических систем.-К.: Техника, 1990.-184 с.
196. Кругликов В.П. Вероятностный машинный эксперимент в приборостроении.-Л.: Машиностроение, 1985.-247 с.
197. Квасніков В.П. Оптимальне керування процесом гасіння коливань базової частини трикоординатної ІВС // Вісник Кіровоградського державного технологічного університету.– 2002.-№ 2.– С.30-32.
198. Белов Ю.А. Математическое обеспечение сложного эксперимента.-К.: Наукова думка, Т.1, 1982.-300 с.; Т.4, 1986.-260 с.
199. Лебедев А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях.-М.: Радио и связь, 1989.-258 с.
200. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ.-М.: Радио и связь, 1988.-232 с.
201. Проников А.С. Концепция прогнозирования параметрической надежности машин // Известия ВУЗов Машиностроение. -1991. -№3.- С. 37-45.
202. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ.-М.: Мир, 1980.-288 с.
203. Ж. Аш, П. Андре. Датчики измерительных систем в 2 книгах / Под. редакцией Обухова А.И.-М.: Мир, 1992.-296 с.
204. Староселец В.Г. Методы построения программ функционального

- диагностирования.-Л.: Машиностроение 1986.-246 с.
205. Артющенко В.М., Соленов В.И. Оценка точности измерения информационного параметра сигнала на фоне аддитивной негауссовой помехи // Вестник МГТУ. Серия Приборостроение.-1997.-№4.-С.9-14.
 206. Лищенко А.И. Электромагнитный привод робототехнических систем.-1986.-266 с.
 207. Игнатьев М.Б., Мироновский Л.А., Юдович В.С. Контроль и диагностика робототехнических систем.-Л.: ЛИАП, 1985.-148 с.
 208. Алиев Г.М. Итерационные методы повышения точности измерений.- М.: Энергоатомиздат, 1986.-244 с.
 209. ГОСТ 8.009-96 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.-М.: Изд-во стандартов 1996.-54 с.
 210. Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем.-Л.: Энергоатомиздат, 1988.-192с.
 211. Артюшин Л.М. Теория автоматизированного управления.-К.: КИВВС, 1995.-628 с.
 212. Абрамов О.В. Прогнозирование состояния технических систем.- М.: Наука, 1990.-126 с.
 213. Бесекерский В.А., Небылов А.В. Робототехнические системы автоматического управления.-М.: Наука, 1983.-234 с.
 214. Безвесільна О.М., Таланчук П.М. Відлікові та реєструючі пристрої приладів.-К.: КПІ, 1993.-226 с.
 215. Белоусов В.Я., Кондратов В.Т., Квасников В.П. Анализ алгоритмов обработки результатов многократных измерений, используемых в ИИС // Вісник ЧІТІ м. Черкаси.- 1999. №1- С. 3-7.
 216. Будаев В.А. Проницаемые пористые материалы.-Л.: Машиностроение 1986.-234 с.
 217. Бухтияров А.В. Контроль качества продукции.-М.: Знание, 1988.-184 с.
 218. Вертю Ж. Телеуправление роботами с помощью ЭВМ. - М.: Мир, 1989.-316 с.
 219. Волкович В.Л., Волошин А.Ф. Модели и методы оптимизации сложных

- систем.-К.: Наукова думка, 1992.-312 с.
220. Вомосов С.С., Гейлер З.И. Управление качеством продукции средствами активного контроля.-М.: Изд-во стандартов, 1989.-264 с.
 221. Горский. Динамическое совершенствование механических систем.-К.: Техника.-1987.-200 с.
 222. Девятериков И.П., Позняк А.С. Оптимизация механических систем в условиях неопределенности.-М.: МФТИ, 1984.-320 с.
 223. Капустин Н.М. Особенности формирования многомерной информации обратных связей и технологических процессов // Вестник машиностроения, 1995.-№2.-С. 98-108.
 224. Кузнецов А.В. Многоканальная система повышения точности и живучести.-К.: Вища школа, 1994.-258 с.
 225. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя.-М.: Наука, 1991.-432 с.
 226. Максимович Н.А. Вычислительные динамические коррекции систем контроля и управления.-К.: ИПМЭ НАН Украины, 1991.-16 с.
 227. Згуровский М.З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования.-К.:Техника.-1990.-246 с.
 228. Палей М.А. Отклонение формы и расположения поверхностей.-М.: Машиностроение 1973.-258 с.
 229. Соболев В.А. Разделение движения методом интегрального многообразия.-М.: Наука, 1988.-284 с.
 230. Поліщук Є.С. Технічні засоби автоматизації вимірів та керування науковими дослідженнями.-Львів: ЛПІ, 1991.-188 с.
 231. Тимофеев В.Г. Анализ влияния геометрических ограничений на зону обслуживания роботов // Известия ВУЗов. Машиностроение, 1986.-№7.-С. 84-92.
 232. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.-М.: Наука, 1991.-288 с.
 233. Ямпольский Л.С. Штучний інтелект у плануванні та управлінні виробництвом.-К.: Вища школа, 1995.-242 с.

234. Штейнвольф А.Л. Расчеты и имитация негауссовых случайных вибраций.-К.: Наукова думка.-1993.-250 с.
235. Кунченко Ю.П. Стохастические полиномы, их свойства и применение для нахождения оценок параметров.-Черкассы.: ЧИТИ.-2002.-240 с.

ДОДАТКИ

Акти впровадження

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»
The State Concern UkrOBORONPROM

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
“НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ
ОБ’ЄДНАННЯ
“КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ”



PUBLIC JOINT STOCK COMPANY
“RESEARCH-AND-PRODUCTION
ASSOCIATION
“KYIV AUTOMATICS PLANT”

вул. Старокіївська, 10, м. Київ, 04116
Україна Тел./факс: +38044-236-62-75
http://www.kza.com.ua E-mail: kza@kza.com.ua
mail: kza@kza.com.ua

10 Starokyivska str., Kyiv, 04116, Ukraine
Tel/fax: +38044-236-62-75
http://www.kza.com.ua E-

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший заступник Голови Правління,
Головний інженер
ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»
Цірук В. Г.
« » 2019 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Кузьмич Людмили Володимирівни

Ми, що нижче підписалися, головний метролог Малахов В.В., начальник КТУ Возняковський А.О., Начальник СКБ Петренко О.В. склали дійсний акт про те, що результати дисертаційної роботи Кузьмич Л.В. впроваджені у практику контролю та вимірювання напружено-деформованого стану високоточних деталей та конструкцій на ПАТ «НВО «Київський завод автоматики».

У роботі вирішені питання оптимізації вибору засобів вимірювання параметрів напружено-деформованого стану та створення нових методів та методик високоточного вимірювання деталей складної конструкції, що значно сприяють підвищенню рівня надійності продукції. Запропоновано методику контролю вимірювання з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів та розроблено алгоритм проведення дистанційного контролю та вимірювання напружено-деформованого стану.

Використання вище наведених результатів дисертаційної роботи Кузьмич Л.В. дозволило забезпечити підприємству:

- Вимірювання параметрів напружено-деформованого стану деталей складних конструкцій на основі запропонованого методу для прогнозування та діагностики відмов складних виробів;
- Вимірювання параметрів напружено-деформованого стану деталей складних конструкцій запропонованою приладовою системою, що дозволило з похибкою навчання 8% в умовах малого обсягу контрольної вибірки;
- Підвищення ефективності вимірювального процесу для забезпечення точності та стабільності технологічного процесу виготовлення деталей на основі запропонованого диференційного методу вимірювання параметрів напружено-деформованого стану.

Комісія підтверджує, що результати дисертаційної роботи Кузьмич Л.В. мають значний науковий внесок в розробку по вимірюванню механічних величин і представляють практичний інтерес для фахівців ПАТ «НВО «Київський завод автоматики».

Взаємних фінансових претензій організації не мають.

Головний метролог
Головний технолог
Начальник СКБ

В.В. Малахов
А.О. Возняковський
О.В. Петренко

Продовження Додатку А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора
ПП «Фірма Валеан і К»

Кислиця А.В.

27 серпня 2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових положень та висновків докторської дисертаційної роботи
к.т.н., доцента Кузьмич Людмили Володимирівни в розробках
приватного підприємства «Фірма Валеан і К»

Комісія приватного підприємства «Фірма Валеан і К» у складі начальника лабораторії ПП «Валеан і К» Степанюк І.В. та головного спеціаліста ПП «Фірма Валеан і К» Івашук С.С. констатує, що дисертаційна робота докторанта Національного авіаційного університету к.т.н., доцента Кузьмич Л.В. присвячена розробці методів та засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних конструкцій.

Розробка приладів вимірювання механічних величин з підвищеними метрологічними характеристиками, насамперед: напруження та тиску являє значну практичну зацікавленість для фахівців приватного підприємства «Фірма Валеан і К».

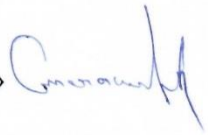
Комісія підтверджує, що наукові положення та висновки дисертаційної роботи Кузьмич Л.В., зокрема цифрова корекція температурної похибки вимірювання механічних величин, у тому числі параметрів напружено – деформованого стану деталей складної конструкції та принципи побудови аналогових інтерфейсів інформаційно – вимірювальних систем для багатоканальних дистанційних вимірювань механічних величин з

Продовження Додатку А

резистивними тензодатчиками з покращеними метрологічними характеристиками були реалізовані при виконанні технічних проектів по улаштуванні, експлуатації та ремонту засобів контролю та вимірювання механічних величин.

Практичне використання результатів дисертаційної роботи Кузьмич Л.В. дало змогу покращити техніко – економічні показники, підвищити завадостійкість, швидкодію та метрологічні характеристики наявних приладів та засобів контролю і вимірювання механічних величин.


Взаємних фінансових претензій організації не мають.

Начальник лабораторії ПП «Валеан і К»  І.В. Степанюк

Головний спеціаліст ПП «Валеан і К»  С.С. Іващук

Продовження Додатку А

ПОГОДЖЕНО

Проректор з навчальної
роботи НАУ

 А.Г.Гудманян
 “ ” 2019р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової
роботи НАУ

 В.П. Харченко
 “ ” 2019 р.

АКТ

впровадження результатів докторської дисертаційної роботи

Комісія у складі: голова комісії – завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем д.т.н., доцент Орнатський Д.П. та членів комісії: доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій к.т.н., доцент Осмоловський О.І., старший викладач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій к.т.н. Катаєва М.О. констатують, що результати дисертаційної роботи докторанта кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету Кузьмич Людмили Володимирівни впроваджені у навчальний процес Національного авіаційного університету на кафедрі інформаційно-вимірювальних систем та на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, а саме:

Найменування впровадженого результату дисертаційної роботи (приладова система, метод, методика, рекомендації, алгоритми, програми, інше)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний, інший)
1	2
1. Методика підвищення достовірності вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій.	1. Метрологічні характеристики засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій дозволили знизити систематичну похибку вимірювань. Розширено діапазон вимірювання. Похибка налаштування вимірювальних засобів має суттєвий вплив на надійність методу вимірювання.
2. Запропонована комп'ютеризована приладова система для контролю та вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій	2. Конструкція та модель комп'ютеризованої приладової системи універсальні, що дозволяють використовувати її в навчальних цілях

3. Запропонований аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань параметрів напружено – деформованого стану складних технічних конструкцій

3. Даний аналоговий інтерфейс за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків дозволяє підвищити точність вимірювання та завадозахищеність

Результати дисертаційної роботи Кузьмич Л.В. впроваджені у навчальний процес кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій та кафедри інформаційно-вимірювальних систем:

- використовуються у курсах лекцій та лабораторних роботах з дисциплін «Фізичні основи сучасної метрології» , «Основи метрології та електричних вимірювань» за спеціальністю «Інформаційні вимірювальні системи».
- застосовуються в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності «Інформаційні вимірювальні системи».

Голова комісії:

Д.П. Орнатський

Члени комісії:

М.О. Катаєва

О.І. Осмоловський



ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ЗАВОД 410 ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ»
 State Enterprise Plant 410 Civil Aviation

Україна, 03151, Київ-151, Повітрофлотський пр., 94
 aviamark@410.kiev.ua

тел.: (44) 246-99-26, факс: (44) 246-99-83

94, Povitroflotskiy ave., Kiev, 03151, Ukraine
 arp410@410.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ



Заступник генерального директора –
 Технічний директор
 ДП «ЗАВОД 410 ЦА»

Жигінас В.В.

13 08 2019.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових положень та висновків докторської дисертаційної роботи
 к.т.н., доцента Кузьмич Людмили Володимирівни в розробках
 ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «ЗАВОД 410 ЦА»

Комісія ДП «ЗАВОД 410ЦА» у складі:

Голова комісії – Головний конструктор О.В. Кіпров

члени комісії:

Головний метролог - начальник ЦЗЛ І.І. Бобор,

Начальник лабораторії НК О.М. Жорноклей,

констатують, що дисертаційна робота докторанта Національного авіаційного університету к.т.н., доцента Кузьмич Л.В. присвячена розробці методів та засобів вимірювання параметрів напружено – деформованого стану складних конструкцій.

Розробка приладів вимірювання механічних величин з підвищеними метрологічними характеристиками, насамперед: переміщення, сили, напруження, тиску, потужності представляє великий практичний інтерес фахівців ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «ЗАВОД 410 ЦА».



Продовження Додатку А

Комісія підтверджує, що наукові положення та висновки дисертаційної роботи Кузьмич Л.В., зокрема методи вимірювання напружено – деформованого стану деталей складної конструкції та принципи побудови аналогових інтерфейсів ІВС для багатоканальних дистанційних вимірювань механічних величин з резистивними тензодатчиками з покращеними метрологічними характеристиками були реалізовані при виконанні технічних проєктів по ремонту авіаційної техніки, зокрема АН-32. Економічний ефект від впровадження нової прецизійної вимірювальної системи на базі раніше розробленої складає більше 250 тис. грн. на рік.

Практичне використання знайшли запропоновані Кузьмич Л.В. методи та алгоритми цифрової температурної корекції похибок тензодатчиків для моніторингу параметрів напружено – деформованого стану деталей складної конструкції, зокрема стану корпусних деталей літака.

Комісія відмічає також теоретичний вклад Кузьмич Л.В. у вирішення проблеми підвищення метрологічних характеристик приладової системи вимірювання напружено – деформованого стану деталей складної конструкції.

Взаємних фінансових претензій організації не мають

Головний конструктор



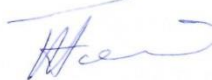
О.В. Кіпров

Головний метролог-начальник ЦЗЛ



І.І. Бобир

Начальника лабораторії НК



О.М. Жорноклей

Патент України № 134572





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **134572** (13) **U**
(51) МПК (2019.01)
G01R 21/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 12440	(72) Винахідник(и): Квасніков Володимир Павлович (UA), Кузьмич Людмила Володимирівна (UA), Орнатський Дмитро Петрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 14.12.2018	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, просп. Комарова, 1, м. Київ, 03058 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.05.2019	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 27.05.2019, Бюл.№ 10	

(54) АНАЛОГОВИЙ ІНТЕРФЕЙС ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИПЛЕКСОРА ТА РЕЗИСТИВНИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

(57) Реферат:

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексор та резистивних тензодатчиків містить послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, та вхід якого з'єднаний з джерелом живлення через аналоговий демультимплексор, а виходи вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор підключено до входів вимірювального підсилювача з диференціально-струмовими входами та першим та другим виходами, виконаний на операційних підсилювачах, та двоканальний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дровими, крім того джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий демультимплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, перший вхід якого під'єднано до першого виходу вимірювального підсилювача, а другий вихід якого під'єднано до другого входу АЦП, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду виконано за схемою інвертора струму.

UA 134572 U

(11) **134572**(19) **UA**(51) МПК (2019.01)
G01R 21/00(21) Номер заявки: **u 2018 12440**(22) Дата подання заявки: **14.12.2018**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **27.05.2019**(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **27.05.2019, Бюл. № 10**(72) Винахідники:
**Квасніков Володимир Павлович, UA,
Кузьмич Людмила Володимирівна, UA,
Орнатський Дмитро Петрович, UA**(73) Власник:
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
просп. Комарова, 1, м. Київ,
03058, UA**

(54) Назва корисної моделі:

АНАЛОГОВИЙ ІНТЕРФЕЙС ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИПЛЕКСОРА ТА РЕЗИСТИВНИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

(57) Формула корисної моделі:

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультимплексора та резистивних тензодатчиків, що містить послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, та вхід якого з'єднаний з джерелом живлення через аналоговий демультимплексор, а виходи вимірювального ланцюга через аналоговий мультимплексор підключені до входів вимірювального підсилювача з диференціально-струмовими входами та першим та другим виходами, виконаний на операційних підсилювачах, та двоканальний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дрововими, який відрізняється тим, що джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий демультимплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, перший вхід якого під'єднано до першого виходу вимірювального підсилювача, а другий вихід якого під'єднано до другого виходу АЦП, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду виконано за схемою інвертора струму.

(11) 134572

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 4015220519.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.
2. Виконати пошук за номером заявки.
3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту

І.Є. Матусевич

27.05.2019



UA 134572 U

Корисна модель належить до області вимірювальної техніки, а саме - до електричних вимірювань неелектричних величин, у даному разі механічних. Резистивні тензодатчики перетворюють у зміну свого опору деформацію, яка практично є рівною деформації об'єкта у місці закріплення датчика. Ці датчики є пасивними і для їх збудження (ініціалізації) використовують джерело живлення, підключене до вимірювального ланцюга, який містить тензодатчики.

Відомий аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків [1], який містить у своєму складі послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг з резистивними тензодатчиками, вимірювальний підсилювач та аналоговий перетворювач логометричного типу. Джерелом живлення є джерело постійної напруги, гальванічного ізольоване від землі. Вимірювальний ланцюг виконаний як невідновлена мостова схема з двома тензорезисторами та двома підстроювальними резисторами у своїх плечах.

Сигнал з виходу вимірювального ланцюга передається на вхід вимірювального підсилювача за допомогою дротових ліній зв'язку. Несиметрія цих ліній з урахуванням значного вхідного опору вимірювального підсилювача призводить до того, що виникає різниця потенціалів (напруга завади), яка може бути порівняною з корисним сигналом, який може бути спотворений навіть слабкою завадою. Ще одним недоліком даного інтерфейсу є те, що даною схемою не враховується зміна опору тензодатчиків у процесі експлуатації, що, в свою чергу, знижує точність вимірювання при автокорекції.

Аналогово-цифровий інтерфейс для дистанційних вимірювань [2] містить послідовно з'єднаний вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, вхід якого зв'язаний з джерелом живлення, вимірювальний підсилювач, виконаний на операційних підсилювачах, включених за двокаскадною схемою, та аналого-цифровий перетворювач логометричного типу, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими. Джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий демультимплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду включено за схемою інвертора струму.

Недоліком даної конструкції є наявність похибок, що виникають через корельовані шуми операційних підсилювачів, та наведення на "загальний" опір в "земляному" контурі.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищити завадо захищеність та точності дистанційних вимірювань параметрів тензодатчиків.

Поставлена задача вирішується тим, що аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань на базі резистивного тензодатчика містить послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, та вхід якого з'єднаний з джерелом живлення через аналоговий демультимплексор, а виходи вимірювального ланцюга через аналоговий мультимплексор підключено до входів вимірювального підсилювача з диференціально-струмовими входами та першим та другим виходами, виконаний на операційних підсилювачах, та двоканальний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими, згідно з пропозицією джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий демультимплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, перший вхід якого під'єднано до першого виходу вимірювального підсилювача, а другий вхід якого під'єднано до другого входу АЦП, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду виконано за схемою інвертора струму.

На кресленні показано схему запропонованого аналогового інтерфейсу для дистанційних вимірювань за допомогою мультимплексора та резистивних тензодатчиків, що складається з:

1 - вимірювальний ланцюг N-ї кількості; 2 - вимірювальний підсилювач з диференціально-струмовими входами, який виконано на операційних підсилювачах ОП₁ та ОП₂; 3 - двоканальний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою; 4 - аналоговий демультимплексор з третім станом, виконаний на ключах К₁, К₂ та К₃; 5 - джерело постійного струму (без гальванічної розв'язки); 6 - мікроконтролер; 7 - резистивний тензодатчик; 8-11 - зразкові резистори; 12 - підстроювальний резистор; 13-14 - операційні підсилювачі з диференціально-струмовими входами; 15-17 - резистори; 18 - аналоговий диференціальний

UA 134572 U

мультиплексор; 19 - ЕДС, що є еквівалентом корельованих шумів та напруги в "земляному" контурі через "спільний" опір.

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків працює наступним чином. Цикл вимірювання складається з чотирьох робочих тактів. В першому такті демультимплексор 4 знаходиться в "третьому стані", тобто коли всі ключі даного демультимплексора закриті і струм ініціалізації I_0 не потрапляє у вимірювальний ланцюг 1. При цьому результати вимірювання вихідних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ запам'ятовуються в пам'яті комп'ютера під назвою "U₁₁" та "U₁₂".

В другому такті ключ K₁ демультимплексора 4 замикається, ключі K₂ та K₃ розімкнені. В цьому випадку запам'ятовуються результати вимірювання операційних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ під назвою: "U₂₁" та "U₂₂".

В третьому такті замикається ключ K₂ до мультиплексора 4, а ключі K₁ та K₃ - розімкнені. В такому випадку результати вимірювання операційних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ запам'ятовуються під назвою: "U₃₁" та "U₃₂".

У четвертому такті ключі K₁ та K₂ розімкнені, а ключ K₃ - замкнений. В цьому випадку запам'ятовуються результати вимірювання операційних напруг операційних підсилювачів ОП₁ та ОП₂ під назвою: "U₄₁" та "U₄₂".

Скорегований результат вимірювання обчислюємо за формулою:

$$\delta = \delta_{\text{ном}} \cdot \frac{\frac{U_{22} - U_{12}}{U_{21} - U_{11}} - \frac{U_{42} - U_{12}}{U_{41} - U_{11}}}{\frac{U_{32} - U_{12}}{U_{31} - U_{11}} - \frac{U_{42} - U_{12}}{U_{41} - U_{11}}}$$

Таким чином, запропонований аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань підвищує точність вимірювань та завадозахищеність.

Джерела інформації:

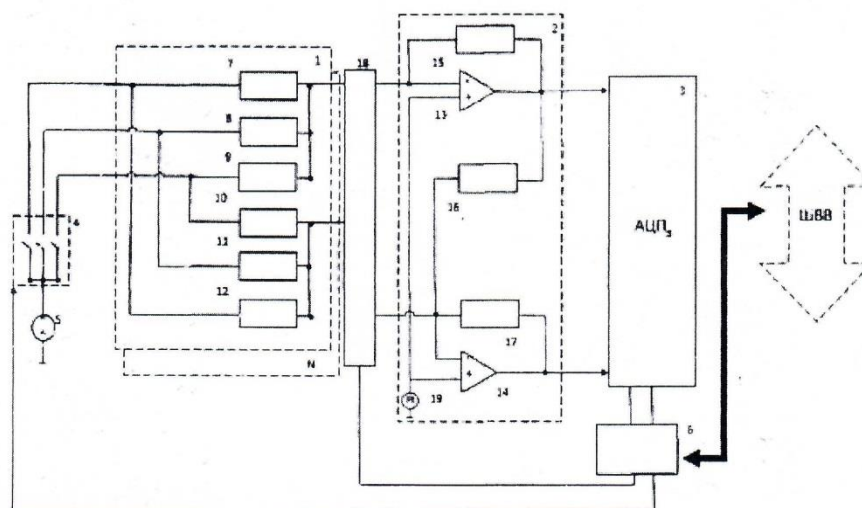
1. Аш Дж. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн. 1. /пер. с франц. /Дж. Аш - М.: Мир, 1992. - 480 с.

2. Патент на корисну модель № 109796, кл. G01R 21/00, 2016, Бюл. № 17.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою мультиплексора та резистивних тензодатчиків, що містить послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, та вхід якого з'єднаний з джерелом живлення через аналоговий демультимплексор, а виходи вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор підключені до входів вимірювального підсилювача з диференціально-струмовими входами та першим та другим виходами, виконаний на операційних підсилювачах, та двоканальний аналого-цифровий перетворювач з одночасною вибіркою, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дрововими, який відрізняється тим, що джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий демультимплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, перший вхід якого під'єднано до першого виходу вимірювального підсилювача, а другий вихід якого під'єднано до другого входу АЦП, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші - зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду виконано за схемою інвертора струму.

UA 134572 U



Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток В

Таблиця В.1

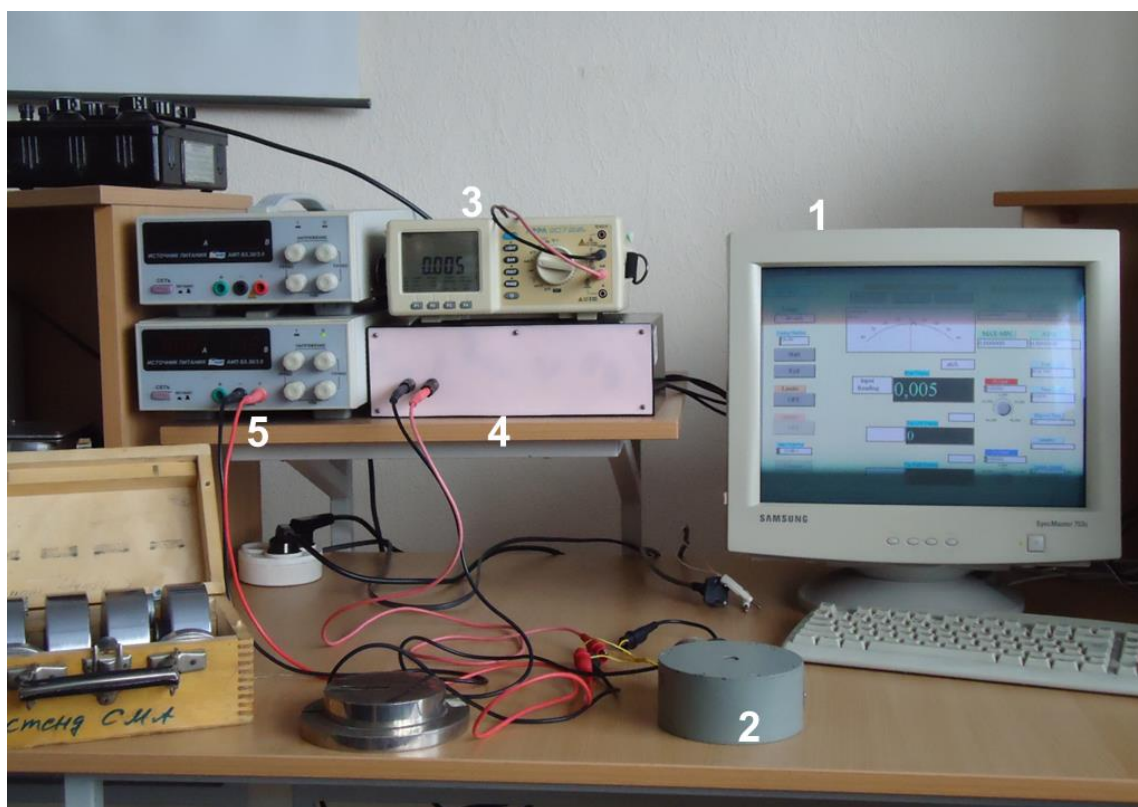
Значення коефіцієнтів перетворення та чутливості
тензометричних засобів

№	Тензометричні засоби	Коефіцієнт перетворення та чутливості	Одиниці вимірюв.
1	Тензорезисторів дровових і фольгових	1,8...2,2	
2	Напівпровідникових	до 200	
3	Тензометричних силовимірювачів	1...5 0,02...2	мВ/В ОВД/Н
4	Тензометричних підсилювачів	1...100 3000...250000	мА/мВ мА/ОВД
5	Приладів вимірювання статичних деформацій (ціна ділення)	0,2...25	ОВД

Таблиця В.2

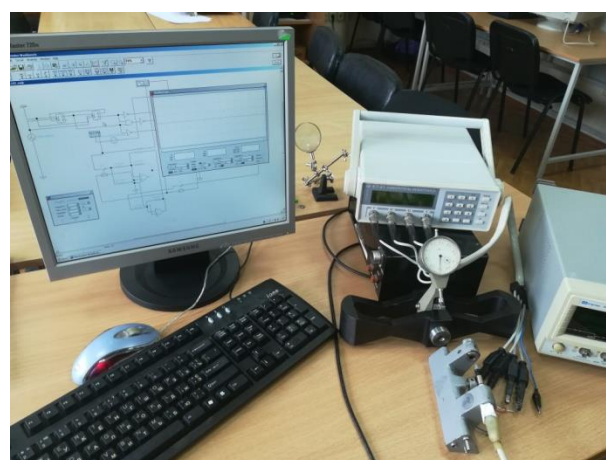
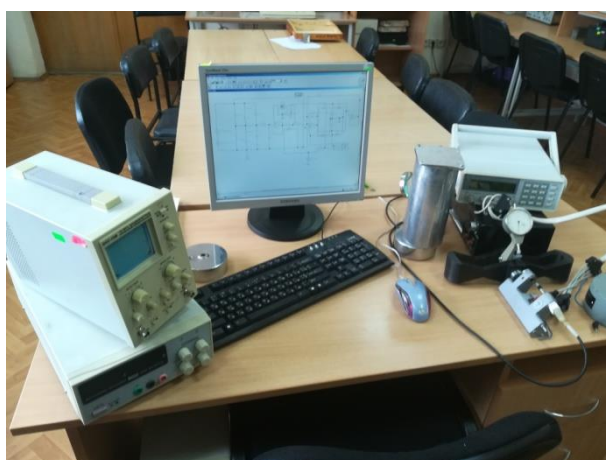
Залежність чутливості від умов зв'язку тензорезисторів з поверхнею

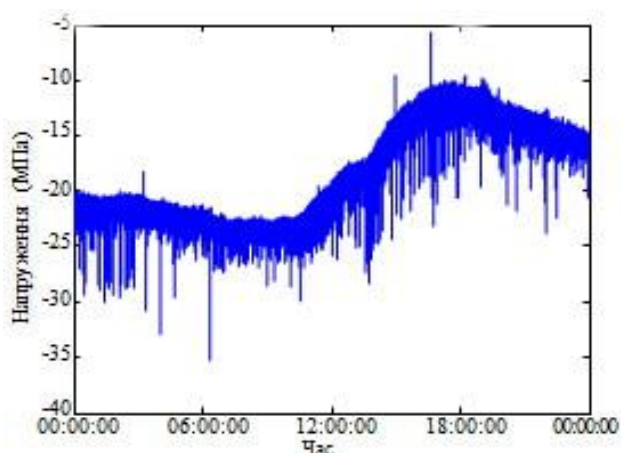
Схема приклеювання тензорезистора		Чутливість тензорезистора S_T	
		При розтягу	При стиску
Клейовий шар 	Всією поверхнею	2,0	1,93-2,0
	В межах решітки	1,6–1,8	1,6–1,8
	В межах кінцевих ділянок основи	1,9–1,95	0



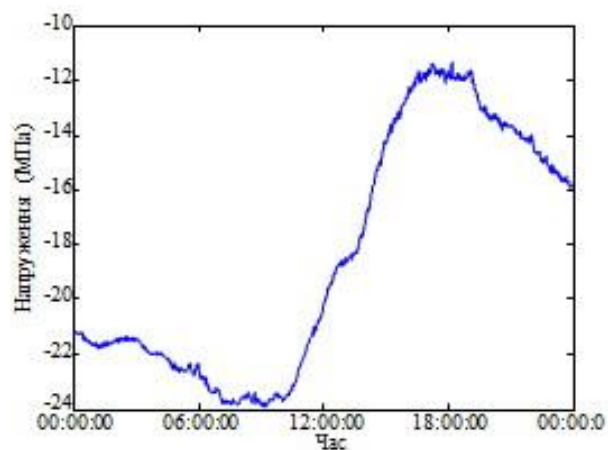
Макет для проведення експериментальних досліджень:

1 - графічний інтерфейс; 2 - тензодатчик; 3 - система збору даних з цифровим оптичним інтерфейсом; 4 - вимірювальний перетворювач (аналоговий інтерфейс); 5 - джерело живлення тензодатчика

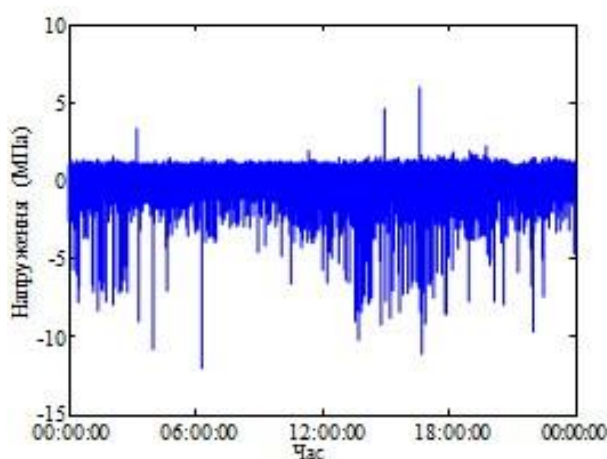




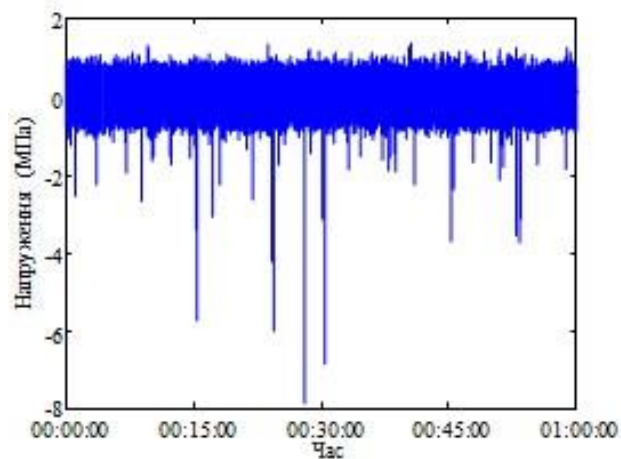
а)



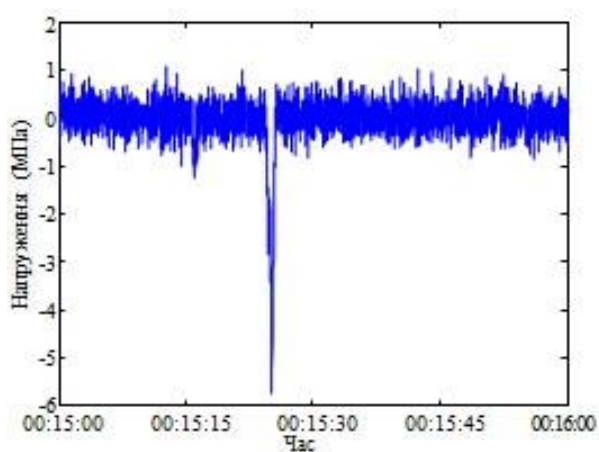
б)



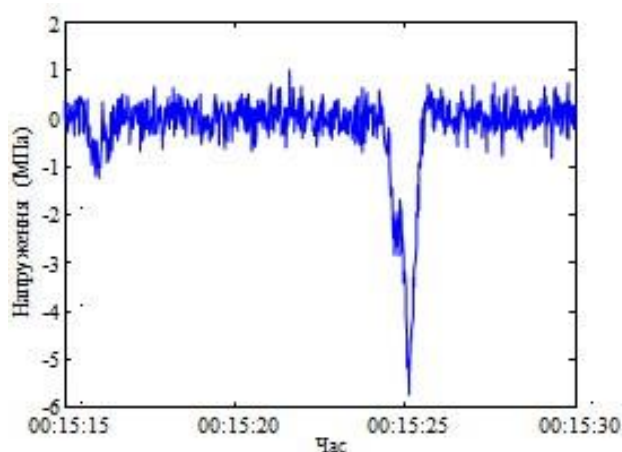
в)



г)



д)



е)

Графіки зміни напруження у часі для досліджуваної конструкції за умов :
а) - без врахування динамічного навантаження; б) - з врахуванням температурних змін; в) - з врахуванням динамічного навантаження; г) - з врахуванням динамічного навантаження за 1 год; д) - з врахуванням динамічного навантаження за 1 хв; е) - з врахуванням динамічного навантаження впродовж 15 с.

Експериментальне визначення кількісних показників динамічних
характеристик досліджуваної приладової системи

